

Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Ingeniería

**“COMPARACIÓN DE MÉTODOS COMBINADOS  
(ÓSMOSIS DIRECTA-MICROONDAS Y SECADO  
CONVECTIVO POR AIRE CALIENTE-  
MICROONDAS) PARA LA DESHIDRATACIÓN DE  
FRUTOS DEL BOSQUE”**

**Anabel Rodriguez**

Tesis presentada para obtener el título de

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

**Director:** Dr. Rodolfo H. Mascheroni

**Jurado:** Dr. Jorge R. Aguerre

MSC Susana M. Nolasco

**Área:** Departamento de Ingeniería Química

**Fecha de defensa:** 19 de Marzo de 2014



El presente trabajo de tesis para la obtención del título de Doctor en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos-CIDCA (CONICET-UNLP).

Para la realización del doctorado se dispuso de las BECAS DOCTORALES INTERNAS DE POSTGRADO TIPO I (3 años) y TIPO II (2 años), otorgadas por el CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS (CONICET).

---

*Quisiera expresar mis agradecimientos....*

- ✓ Al Dr. Rodolfo H. Mascheroni por el estímulo y ayuda que me brindó durante este tiempo, permitiéndome llevar a cabo el trabajo de tesis de manera simple y agradable.
- ✓ A la Dra. Laura Campañone, por brindarme su confianza y asesoramiento en todas las etapas de mi carrera doctoral.
- ✓ A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata por dejarme ser parte de su comunidad y realizar el Doctorado en Ingeniería.
- ✓ Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por otorgarme las Becas Interna de Postgrado Tipo I y II y así obtener el apoyo económico necesario para la realización de este posgrado.
- ✓ Al Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA) por permitirme utilizar los equipos para el avance de las experiencias de laboratorio.
- ✓ A todo el personal del CIDCA por su compañerismo y cariño, además de compartir sus conocimientos que me ayudaron a seguir adelante con el desarrollo de mi trabajo.
- ✓ A mi familia y Fernando, quienes me inculcaron a seguir siempre adelante y darme su amor incondicionalmente. A mi abuela Chicha a quien adoro con el alma. A mi abuelo Américo, que siempre está en mi corazón.
- ✓ A mis amigos de la vida y familiares, por apoyarme y estar siempre en cada momento.

*Muchas Gracias!!*

*Anabel*

---

---

*Dedicado a mi familia y Fernando,  
Gracias por hacerme la vida tan linda y feliz!!*

---

*ASPECTOS QUE ABARCA EL TRABAJO*

Las frutas y vegetales desempeñan un rol fundamental en la dieta y nutrición de las personas ya que son ricas en azúcares (fructosa, glucosa y sacarosa) y son fuentes importantes de vitaminas (E y C). Ellos proporcionan color, sabor, variedad y son de creciente interés como ingredientes estables en la industria alimentaria. Sin embargo, contienen más de un 80% de agua dentro de una estructura rígida de la pared celular, siendo responsable de su alto carácter perecedero.

La deshidratación de frutas es un método que se utiliza tradicionalmente en la conservación de alimentos como así también en la producción de materia prima para la industria. Este proceso no sólo afecta el contenido de agua del producto, también altera otras características físicas, biológicas y químicas del alimento como la actividad enzimática, la descomposición microbiana, viscosidad, dureza, aroma, sabor y palatabilidad de los alimentos.

En el siguiente trabajo se muestra el estudio de dos métodos combinados de deshidratado aplicados en frambuesas variedad Heritage y arándanos variedad O'neal. Ambos métodos consistieron en una etapa de pretratamiento, cuyo objetivo fue preservar las características nutricionales y organolépticas, importantes para la aceptación del producto frente a los consumidores. En la primera instancia del deshidratado se utilizaron como pretratamientos la deshidratación osmótica, en la cual los frutos fueron inmersos en soluciones de sacarosa, y el secado por aire caliente, donde los frutos fueron expuestos a una corriente de aire horizontal permitiendo un secado uniforme. Durante estos procesos se evaluaron diferentes condiciones de trabajo (temperatura y concentración de la solución, velocidad y temperatura del aire y tiempo) y los efectos sobre las características físico-químicas (pérdida de agua, sólidos solubles, actividad acuosa y pérdida de peso), nutricionales (capacidad antioxidante) y organolépticas (color y textura) de los frutos.

En ambos tratamientos se obtuvieron cinéticas de comportamiento de las variables estudiadas. Una vez analizados los resultados, se procedió a la selección de las mejores condiciones de proceso que permitieron mantener en gran proporción todas las características de interés.

Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un secado por microondas para alcanzar la condición final establecida para el proceso:  $a_w = 0.55$  (WC: 15% bh). La variable estudiada fue la potencia de trabajo aplicada sobre los frutos.

En ambos métodos combinados, se observó una rápida disminución de la actividad acuosa y aumento de la pérdida de pesos relacionados con la rápida disminución del contenido de agua, permitiendo así disminuir el tiempo de proceso. A su vez, todas las características organolépticas y nutricionales fueron afectadas por las microondas. En frambuesas solo se pudo trabajar con una potencia intermedia (350W) debido a su frágil estructura. En arándanos se observaron diferentes comportamientos según las condiciones y métodos aplicados sobre los frutos. Tanto en frambuesas como en arándanos, el tiempo de proceso fue afectado por los tratamientos previos al secado final. Luego del análisis de todas las variables de proceso en relación a las características del producto final, se procedió a la selección del mejor método de deshidratado.

En cuanto a la estabilidad microbiológica del producto, la misma fue comprobada mediante el almacenamiento de arándanos secos, sin presentarse crecimiento microbiano en el período estudiado. Sin embargo, el contenido de agua y actividad acuosa aumentaron levemente provocando modificaciones texturales y de color, lo que puede llevar a que el producto dentro de los cuatro meses de almacenamiento no sea aceptable para los consumidores.

El estudio de los diferentes métodos de secado, junto con la evaluación de las características fisicoquímicas, organolépticas y nutricionales de los frutos, permitió seleccionar un proceso para prolongar la vida útil de los mismos, manteniendo en gran medida los atributos de calidad y así garantizar la aceptación del producto por parte de los consumidores.

**ÍNDICE GENERAL**

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>2</b>
1.1. Generalidades sobre las frambuesas	2
1.1.1. Origen, morfología y taxonomía	2
1.1.2. Composición química y nutricional: Beneficios	2
1.1.3. Regiones productoras y procesamientos	3
1.2. Generalidades sobre los arándanos	4
1.2.1. Origen, morfología y taxonomía	4
1.2.2. Composición química y nutricional: Beneficios	4
1.2.3. Regiones productoras y procesamientos	6
1.3. Generalidades del secado combinado por deshidratación osmótica- microondas de frutas	7
1.4. Generalidades del secado combinado por aire caliente-microondas de frutas.	8
1.5. Objetivos	10
1.5.1. Objetivo general	10
1.5.2. Objetivos específicos	10
1.5.3. Hipótesis	11
<b>2. Deshidratación osmótica</b>	<b>13</b>
2.1. Materiales y Métodos	19
2.1.1. Diseño experimental	19
2.1.2. Preparación de las muestras	20
2.1.3. Pretratamientos	20
2.1.4. Deshidratación osmótica	22
2.1.5. Determinación de las propiedades ópticas	24
2.1.6. Determinación de las propiedades mecánicas	26
2.1.7. Evaluación de la capacidad antioxidante	28
2.1.7.1 Determinación por DPPH	28
2.1.7.2 Determinación por ABTS <sup>+</sup>	28

2.1.8. Análisis estadístico	29
2.2. Resultados y Discusión	30
FRAMBUESAS	
2.2.1. Pretratamientos	30
2.2.2. Deshidratación osmótica	31
2.2.3. Evaluación de las propiedades ópticas	35
2.2.4. Evaluación de las propiedades mecánicas	38
2.2.5. Evaluación de la capacidad antioxidante	41
ARÁNDANOS	
2.2.6. Pretratamientos	43
2.2.7. Deshidratación osmótica	44
2.2.8. Evaluación de las propiedades ópticas	48
2.2.9. Evaluación de las propiedades mecánicas	50
2.2.10. Evaluación de la capacidad antioxidante	53
2.3. Conclusiones	55
<b>3. Secado por aire caliente</b>	<b>59</b>
3.1. Materiales y métodos	61
3.1.1. Diseño experimental	61
3.1.2. Secado por aire caliente	62
3.1.3. Análisis de los parámetros de calidad	63
3.2. Resultados y Discusión	64
FRAMBUESAS	
3.2.1. Secado por aire caliente	64
3.2.2. Evaluación de las propiedades ópticas	67
3.2.3. Evaluación de las propiedades mecánicas	70



3.2.4. Evaluación de la capacidad antioxidante	73
ARÁNDANOS	
3.2.5. Secado por aire caliente	75
3.2.6. Evaluación de las propiedades ópticas	79
3.2.7. Evaluación de las propiedades mecánicas	81
3.2.8. Evaluación de la capacidad antioxidante	84
3.3. Conclusiones	86
<b>4. Secado Combinado con microondas</b>	<b>90</b>
4.1. Materiales y métodos	93
4.1.1. Diseño experimental	93
4.1.2. Secado por microondas (MO)	94
4.1.3. Análisis de los parámetros de calidad	96
4.1.3.1. Capacidad de rehidratación	96
4.2. Resultados y Discusión	97
FRAMBUESAS	
4.2.1. Comparación de métodos combinados	97
4.2.2. Evaluación de las propiedades ópticas	103
4.2.3. Evaluación de las propiedades mecánicas	106
4.2.4. Evaluación de la capacidad antioxidante	109
4.2.5. Evaluación de la capacidad de rehidratación	113
4.2.6. Evolución de las muestras desde el fresco hasta la rehidratación	115
ARÁNDANOS	
4.2.7. Comparación de los métodos combinados con microondas	118
4.2.8. Evaluación de las propiedades ópticas	124
4.2.9. Evaluación de las propiedades mecánicas	128

4.2.10. Evaluación de la capacidad antioxidante	131
4.2.11. Evaluación de la capacidad de rehidratación	135
4.2.12. Evolución de las muestras desde el fresco hasta la rehidratación	137
4.3. Conclusiones	140
<b>5. Almacenamiento de arándanos secos</b>	<b>148</b>
5.1. Materiales y métodos	149
5.1.1. Preparación de las muestras	149
5.1.2. Condiciones de almacenamiento	149
5.1.3. Análisis de los atributos de calidad	149
5.2. Resultados y discusión	151
5.3. Conclusiones	155
<b>6. Conclusiones Generales</b>	<b>157</b>
6.1. Proyecciones	165
<b>7. Transferencia de resultados</b>	
7.1. Revistas	167
7.2. Congresos	167
<b>8. Nomenclatura</b>	<b>170</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>173</b>

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1</b>	Frambuesas.	2
<b>Figura 2</b>	Arándanos.	4
<b>Figura 3</b>	Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica (Erle y Schubert, 2001).	14
<b>Figura 4</b>	Representación del color en el sistema CIELAB.	16
<b>Figura 5</b>	Representación de los cambios en el tejido vegetal durante la DO a) célula fresca b) encogimiento y plasmólisis, c) desunión de las células. (Mayor y col., 2008).	17
<b>Figura 6</b>	Desecador a vacío utilizado en la DO de frambuesas.	20
<b>Figura 7</b>	Agitador orbital (Industria Argentina), para efectuar las DO.	22
<b>Figura 8</b>	Colorímetro Konica Minolta Chromameter Modelo CR 400/410.	24
<b>Figura 9</b>	Analizador de Textura TATX2i.	26
<b>Figura 10</b>	Descripción de las variables medidas en la curva de fuerza-deformación como parámetros de textura: Fuerza Máxima al punto de ruptura de la piel del fruto, Rigidez o Pendiente al punto de ruptura, Deformación (Vargas y col., 2001).	27
<b>Figura 11</b>	Comparación de las muestras tratadas con vacío y sin tratar luego de la deshidratación osmótica de frambuesas.	30
<b>Figura 12</b>	Cinéticas de la deshidratación osmótica de frambuesas en términos de a) disminución del WC, b) aumento de los SS y c) aumento de la WR.	32
<b>Figura 13</b>	Curvas de velocidad durante la deshidratación osmótica de frambuesas bajo las diferentes condiciones estudiadas.	34
<b>Figura 14</b>	Cinéticas de los parámetros de color analizados durante las DO de frambuesas a) $L^*/Lo^*$ y b) $b/b_0$ .	36
<b>Figura 15</b>	Curvas del comportamiento mecánico de los frutos, curva color azul de las frambuesas mediante el test de compresión y curva de color negro de los arándanos mediante el test de ruptura.	38

<b>Figura 16</b>	Cinéticas de las propiedades mecánicas analizadas durante las DO de frambuesas a) F/Fo: Firmeza, b) D/Do: Deformación y c) P/Po: Rigidez.	39
<b>Figura 17</b>	Cinéticas de la capacidad antioxidante durante las DO de frambuesas analizadas por a) $1/EC_{50}(n)$ y b) $ABTS^+(n)$ .	42
<b>Figura 18</b>	Comparación de la composición de las muestras tratadas con EO-NaOH y sin tratar luego de la deshidratación osmótica de arándanos.	43
<b>Figura 19</b>	Cinéticas de la deshidratación osmótica de arándanos en término de a) disminución del WC, b) aumento de los SS y c) aumento de la WR.	45
<b>Figura 20</b>	Curvas de velocidad durante la deshidratación osmótica de arándanos bajo las diferentes condiciones estudiadas.	47
<b>Figura 21</b>	Cinéticas de los parámetros de color analizados durante las DO de arándanos a) $L^*/Lo^*$ y b) $b/bo$ .	49
<b>Figura 22</b>	Cinéticas de las propiedades mecánicas analizadas durante las DO de arándanos a) F/Fo: Firmeza, b) D/Do: Deformación y c) P/Po: Rigidez.	51
<b>Figura 23</b>	Cinéticas de la capacidad antioxidante durante las DO de arándanos analizados por a) $1/EC_{50}(n)$ y b) $ABTS^+(n)$ .	53
<b>Figura 24</b>	Túnel de secado.	62
<b>Figura 25</b>	Cinéticas de secado de frambuesas de a) contenido de agua (WC), b) pérdida de peso (WR) y c) actividad acuosa (aw).	65
<b>Figura 26</b>	Curvas de velocidad de secado bajo las diferentes condiciones estudiadas durante el SAC de frambuesas.	66
<b>Figura 27</b>	Evaluación del color durante el SAC de frambuesas bajo las diferentes condiciones de proceso a) $L^*/Lo^*$ y b) $b/bo$ .	68
<b>Figura 28</b>	Comportamiento de las propiedades mecánicas durante el secado de frambuesas mediante aire caliente a) F/Fo: Firmeza, b) D/Do: Deformación y c) P/Po: Rigidez.	71
<b>Figura 29</b>	Evaluación de la capacidad antioxidante en frambuesas durante el SAC a) $1/EC_{50}(n)$ y b) $ABTS^+(n)$ .	74

<b>Figura 30</b>	Cinéticas de secado de arándanos de a) contenido de agua (WC), b) pérdida de peso (WR) y c) actividad acuosa (aw).	76
<b>Figura 31</b>	Curvas de velocidad de secado bajo las diferentes condiciones estudiadas durante el presecado con SAC de arándanos.	78
<b>Figura 32</b>	Evaluación del color durante el secado por aire caliente de arándanos bajo las diferentes condiciones de proceso a) $L^*/Lo^*$ y b) $b/b_0$ .	80
<b>Figura 33</b>	Comportamiento de las propiedades mecánicas durante el secado de arándanos mediante aire caliente a) $F/F_0$ : Firmeza, b) $D/Do$ : Deformación y c) $P/P_0$ : Rigidez.	82
<b>Figura 34</b>	Evaluación de la capacidad antioxidante en arándanos durante el secado por aire caliente a) $1/EC50$ (n) y b) $ABTS^+(n)$ .	84
<b>Figura 35</b>	Microondas provisto con un autotransformador de salida de potencia variable utilizado en el secado de arándanos.	94
<b>Figura 36</b>	Curva de calibración para la determinación de las potencias impuestas sobre el alimento.	95
<b>Figura 37</b>	Secado por microondas de frambuesas a 500W durante 15 minutos a) y b) frambuesas pretratadas y c) frambuesas sin pretratar.	97
<b>Figura 38</b>	Secado por microondas de frambuesas a 160W: sin pretratar (a y b) y pretratadas con SAC (c, d y e) durante 480 minutos.	99
<b>Figura 39</b>	Cinéticas de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO) de frambuesas en función del tiempo a) disminución del WC, b) aumento de la WR y c) disminución de la aw.	100
<b>Figura 40</b>	Curvas de velocidad de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO) de frambuesas en función del contenido de agua.	101
<b>Figura 41</b>	Evaluación de los parámetros de color durante los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) de frambuesas a) $L^*/Lo^*$ y b) $b/b_0$ .	104

<b>Figura 42</b>	Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) en la evaluación de los parámetros de color en frambuesas al final de los tratamientos.	105
<b>Figura 43</b>	Evolución de los parámetros de textura durante los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) de frambuesas a) F/Fo: Firmeza, b) D/Do: Deformación y c) P/Po: Rigidez.	107
<b>Figura 44</b>	Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) en la evaluación de los parámetros de textura en frambuesas al final de los tratamientos.	108
<b>Figura 45</b>	Comportamiento de la capacidad antioxidante de frambuesas durante los diferentes secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO).	110
<b>Figura 46</b>	Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) en la evaluación de la capacidad antioxidante en frambuesas al final de los tratamientos.	111
<b>Figura 47</b>	Relación entre los métodos utilizados para el análisis de antioxidantes de frambuesas secas.	112
<b>Figura 48</b>	Capacidad de rehidratación de las frambuesas bajo los diferentes métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO).	113
<b>Figura 49</b>	Evaluación de los parámetros de textura en las frambuesas rehidratadas.	114
<b>Figura 50</b>	Evolución de las muestras deshidratadas por microondas sin pretratar y rehidratadas, a) Frescas, b) Deshidratadas y c) Rehidratadas.	115
<b>Figura 51</b>	Evolución de las muestras deshidratadas por microondas pretratadas con SAC y rehidratadas, a) Frescas, b) Predeshidratadas, c) Deshidratadas y d) Rehidratadas.	116
<b>Figura 52</b>	Evolución de las muestras deshidratadas por microondas pretratadas con DO y rehidratadas, a) Frescas, b) Predeshidratadas, c) Deshidratadas y d) Rehidratadas.	117

<b>Figura 53</b>	a) Cinéticas de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC) de arándanos en función del tiempo b) cinéticas de secado microondas de muestras pretratadas osmóticamente, c) cinéticas de secado microondas de muestras pretratadas por aire caliente.	119
<b>Figura 54</b>	Curvas de velocidad de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC) de arándanos en función del contenido de agua.	121
<b>Figura 55</b>	Cinéticas de la actividad acuosa en función del tiempo para los diferentes métodos de secado aplicados en arándanos.	122
<b>Figura 56</b>	Cinéticas de la pérdida de peso en función del tiempo para los diferentes métodos de secado aplicados en arándanos.	123
<b>Figura 57</b>	Evaluación de los parámetros de color durante los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) de arándanos.	125
<b>Figura 58</b>	Comparación de los métodos combinados (SA-MO, DO-MO) y secado control (SAC) en la evaluación de los parámetros de color en arándanos al final de los tratamientos.	127
<b>Figura 59</b>	Evolución de los parámetros de textura durante los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) de arándanos a) F/Fo: Firmeza, b) D/Do: Deformación y c) P/Po: Rigidez.	129
<b>Figura 60</b>	Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) en la evaluación de los parámetros de textura en arándanos al final de los tratamientos.	130
<b>Figura 61</b>	Comportamiento de la capacidad antioxidante de arándanos durante los diferentes secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC).	132
<b>Figura 62</b>	Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) en la evaluación de la capacidad de antioxidantes en arándanos al final de los tratamientos.	133

<b>Figura 63</b>	Relación entre los dos métodos utilizados para el análisis de antioxidantes de arándanos secos.	134
<b>Figura 64</b>	Capacidad de rehidratación de los arándanos bajo los diferentes métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC).	135
<b>Figura 65</b>	Evaluación de los parámetros de textura en arándanos rehidratados.	136
<b>Figura 66</b>	Evolución de las muestras: a) Frescas, b) Secado control (SAC) y c) Rehidratadas.	137
<b>Figura 67</b>	Evolución de las muestras: a) Frescas, b) Pretratadas con SAC, c) Secadas con microondas con potencia 750W y d) Rehidratadas.	138
<b>Figura 68</b>	Evolución de las muestras: a) Frescas, b) Pretratadas con DO, c) Secadas con microondas con potencia 750W y d) Rehidratadas.	139
<b>Figura 69</b>	Empaquetamiento de los arándanos secos durante el almacenamiento.	149
<b>Figura 70</b>	Evolución del contenido de agua (WC) durante el almacenamiento de los arándanos secos.	151
<b>Figura 71</b>	Evolución la actividad acuosa (aw) durante el almacenamiento de los arándanos secos.	152
<b>Figura 72</b>	Evolución de los parámetros de textura durante el almacenamiento de los arándanos secos.	153
<b>Figura 73</b>	Evolución de los parámetros de color al tiempo cero, 60 días y 180 días de almacenamiento de los arándanos secos.	154



**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b>	Composición nutricional de las frambuesas.	3
<b>Tabla 2</b>	Composición nutricional de los arándanos.	5
<b>Tabla 3</b>	Pruebas preliminares realizadas en frambuesas para la selección de las condiciones de pretratamientos previo a la DO.	21
<b>Tabla 4</b>	Pruebas preliminares realizadas en arándanos para la selección de las condiciones de pretratamientos previo a la DO.	21
<b>Tabla 5</b>	Partes constituyentes del Túnel de secado.	63
<b>Tabla 6</b>	Comportamiento de los parámetros de color durante el secado de frambuesas a 70°C.	69
<b>Tabla 7</b>	Ensayo preliminar de muestras con y sin pretratamiento químico con respecto a la remoción del contenido de agua (WC).	75

# *1. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS*

## 1. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS

### 1.1. Generalidades sobre las frambuesas

#### 1.1.1. Origen, morfología y taxonomía

La frambuesa (Figura 1) roja o fresa del bosque (*Rubus idaeus*) es el fruto del frambueso o sangüeso, un arbusto perenne de la familia de las Rosáceas, que crece mayoritariamente en regiones templadas. Es originaria del Monte Ida en Grecia, aunque otras teorías sitúan el origen en Asia o Norteamérica.

La frambuesa es un fruto formado por diferentes drupas o granos rugosos y redondeados que, agrupados, forman una pequeña piña con aspecto circular o cónico. Cada una de las drupas dispone de un pequeño pelo dorado. Su piel contiene un fino vello, aterciopelado, apenas perceptible a simple vista y en su interior dispone de pequeñas semillas que pasan casi desapercibidas durante su degustación en fresco. El tamaño de su base comprende entre 15 y 20 mm de diámetro.



**Figura 1-** Frambuesas.

#### 1.1.2. Composición química y nutricional: Beneficios

En la Tabla 1 se puede observar la composición nutricional de las frambuesas. Estos frutos son extremadamente ricos en antioxidantes y son considerados componentes claves para la buena salud. Los compuestos antioxidantes presentes son la vitamina C o ácido ascórbico, los carotenoides, el ácido elágico y la quercitina, todos ellos de comprobada eficacia anticancerígena. Por otro lado, su riqueza en potasio (151 mg) favorece el buen funcionamiento cardíaco y renal.

Su contenido en carotenoides, luteína y zeaxantina, hace que además de brindarle su color característico, posean una propiedad protectora natural para la salud ocular. A su vez, el ácido fólico presente ofrece beneficios para las embarazadas, ya que esta vitamina también conocida como B<sub>9</sub>, puede prevenir defectos en el feto durante su formación.

**Tabla 1-** Composición nutricional de las frambuesas.

Contenido nutricional cada 100 g	
Valor Energético (kcal)	38.00
Carbohidratos (g)	13.00
Azúcares (g)	8.00
Proteína (g)	0.59
Grasas Totales	0.00
Fibra Alimentaria (g)	5.00
Sodio (mg)	0.00
Provitamina A (mg)	0.00
Vitamina C (mg)	40.00
Calcio (mg)	2.00
Hierro (mg)	2.00

Fuente: USDA. Alimentos Argentinos

### *1.1.3. Regiones productoras y procesamiento*

El 70% de la producción argentina de frambuesas se encuentra en el territorio patagónico (El Bolsón, El Hoyo, Epuyén y Lago Puelo, Valle Inferior del Río Chubut, Alto Valle del Río Negro y Neuquén, Santa Cruz). También existen plantaciones de frambuesas en Tucumán (Tafí Viejo), en Santa Fe (Santa Isabel), y el norte de Bs. As. (Arrecifes, Baradero, Zárate, Lima, San Pedro y Tandil).

En cuanto al procesamiento de frambuesas, el 95% de la producción se comercializa congelado -sistema individual (IQF) y en bloque- con destino a la industria local para

transformarlas en confituras, salsas, jugos concentrados, deshidratados, licores y aguardientes, entre los productos más importantes. Otro importante canal es el sector gastronómico, que demanda fundamentalmente fruta congelada, a través de restaurantes, servicios de *catering*, repostería, heladerías y hoteles. El pequeño volumen de fruta que se comercializa en fresco, se canaliza a través de los supermercados y a través de verdulerías (en la región andina).

## 1.2. Generalidades sobre los arándanos

### 1.2.1. Origen, morfología y Taxonomía

El arándano (Figura 2) es originario del Hemisferio Norte y pertenece a la familia de las Ericáceas, género *Vaccinium*, especie *corymbosum*.

El fruto del arándano es una baya pequeña, casi esférica, que dependiendo de la especie y cultivar puede variar en tamaño de 0.7 a 1.5 cm de diámetro y en el color desde azul intenso a negro. La epidermis del fruto está cubierta por secreciones cerosas, que le dan una terminación muy atractiva.

En Argentina, la variedades que se encuentran son las siguientes: Misty, Sharp blue, Bluecrisp, Emerald, Gulfcoast, O'neal, Jewel, Star, Millennia, Brigitta Blue, Georgia gem, Elliot, Berkeley, Climax, Bluechip, Bluecuinex, Santa Fe, Revielle, Ozark blue, Sierra, Bluecrop.



**Figura 2-** Arándanos.

### 1.2.2. Composición química y nutricional: Beneficios

La estandarización de la Food and Drug Administration (FDA) de los Estados Unidos, determina que el arándano es una fruta con muchas características deseables desde el punto de vista nutricional. En la Tabla 2 observamos que el arándano es de bajo contenido

calórico, pobre en grasas y en sodio, con poco aporte de hidratos de carbono y fuente de fibras y pectinas. Se destacan por su alta concentración en vitamina C y sus propiedades antioxidantes, lo que potencia el sistema inmunológico o de defensas del organismo y contribuye a reducir el riesgo de enfermedades degenerativas, cardiovasculares e incluso del cáncer.

**Tabla 2-** Composición nutricional de los arándanos.

Composición nutricional por 100 g	
Valor energético (kcal)	57
Proteínas (g)	0.74
Grasas totales (g)	0.33
Carbohidratos (g)	14.49
Fibra alimentaria (g)	2.4
Cenizas (g)	0.24
Agua (g)	84.21
Calcio (mg)	6
Cobre (mg)	0.06
Hierro (mg)	0.28
Magnesio (mg)	6
Manganeso (mg)	0.34
Fósforo (mg)	12
Potasio (mg)	77
Selenio (mg)	0.1
Sodio (mg)	1
Zinc (mg)	0.16
Vitamina C (mg)	9.7
Tiamina (mg)	0.04
Riboflavina (mg)	0.04
Niacina (mg)	0.42
Ácido pantoteico (mg)	0.12
Vitamina B6 (mg)	0.05
Fólico (µg)	6
Vitamina A (IU)	54

(Fuente: Base de Datos Nacional del Dpto. de Agricultura de los Estados Unidos, 2004)

Una de sus características es la abundancia de pigmentos naturales (antocianos y carotenoides) de acción antioxidante. Por otro lado, son una buena fuente de potasio, hierro, calcio, taninos de acción astringente y de diversos ácidos orgánicos. La industria farmacéutica lo utiliza como componente de antibióticos, medicamentos para combatir la diabetes y cuadros diarreicos, extracción de colorantes y patologías de la visión.

### 1.2.3. Regiones productoras y procesamiento

La plantación comercial de arándanos en nuestro país (producción del noroeste y especialmente del nordeste argentino) cuenta con ventajas competitivas al anticipar la cosecha respecto a otros países del hemisferio sur, lo que favorece su exportación. El consumo interno es muy escaso destinándose la producción en mayor medida al mercado de exportación.

Las Distintas formas de arándano industrializado son:

*Arándanos IQF (IQF Frozen Blueberries)* o *Arándanos en Bloque (Straight Pack)*: El producto fresco es congelado. Normalmente se utiliza en preparación de repostería.

*Puré (Puree)*: El producto líquido molido y pasteurizado es el de mayor uso en las bebidas a base de jugo de fruta.

*Concentrado de Arándano (Blueberry Concentrate)*: Producto líquido a 70 °Brix usado en la industria de bebidas y otros usos donde se mantiene por si mismo estable hasta cuando se necesita.

*Esencia (Essence)*: Producto utilizado para realzar el sabor del arándano dentro de la industria alimenticia.

*Arándano en Conserva (Canned Blueberries)*: Este producto se puede adquirir en variadas formas, como por ejemplo, la fruta en jarabe o en forma de salsas.

*Arándanos Deshidratados (Dried Blueberries)*: Producto con un 18% de humedad. Se usa como insumo en otros productos finales.

*Producto liofilizado / Producto Secado en Tambor (Freeze Dried/ Drum Dried)*: El proceso por frío mantiene el tamaño y el color de la fruta. El secado mediante rodillo origina un producto en polvo o escamas.

*Fruta en Chips y Trozos (Fruit Chips and Bits)*: Esos productos se consumen bien en áreas donde no están disponibles frutas frescas o congeladas.

### 1.3. *Generalidades del Secado Combinado por Deshidratación osmótica-Microondas de frutas*

En la actualidad existe una amplia tendencia mundial por la investigación y desarrollo de técnicas de conservación de alimentos de alto contenido acuoso que permiten obtener productos de gran calidad nutricional, conservando las características de color, aroma y sabor de los alimentos frescos como así también optimizar costos y tiempos de procesamiento.

Muchos estudios llevados a cabo en los últimos años demostraron que el uso de la deshidratación osmótica en el procesamiento de frutas y verduras genera muy buenos resultados en la reducción del contenido de agua con el aumento simultáneo del contenido de materia seca (Kowalska y Lenart, 2001) y el logro de productos sabrosos y atractivos (Piotrowski y col., 2002).

La deshidratación osmótica (DO) puede ser descripta como una deshidratación parcial de los materiales a través del proceso de ósmosis, lo cual implica la inmersión de los frutos durante un determinado tiempo en una solución hipertónica, frecuentemente en soluciones con azúcares tales como sacarosa, glucosa, fructosa, entre otras. Una pérdida por arriba del 50% de la humedad inicial puede ser alcanzada dependiendo de varios factores tales como las características del material, la concentración, temperatura y tipo del medio osmótico, etc. La utilización del azúcar durante la DO permite lograr dos efectos benéficos que ayudan a producir un alimento de alta calidad: 1) la inhibición de la polifenoloxidasa y 2) la prevención de la pérdida de compuestos volátiles durante el deshidratado, incluso bajo vacío. A su vez, los cambios en la composición por el ingreso del azúcar pueden ser explotados para crear propiedades distintivas en el producto final (Erle y Schubert, 2001).

Luego del paso osmótico es necesaria la aplicación de un método complementario para producir un producto estable frente a las condiciones de almacenamiento. Por esa causa la deshidratación osmótica ha sido extensamente estudiada en combinación con otras técnicas. El uso del secado con aire caliente luego de la deshidratación osmótica ha sido estudiado principalmente para manzanas (Karathanos y Kostaropoulos, 1995), arándanos (Venkatachalapathy y Raghavan, 1998), damasco (Nieto y col., 2001), peras (Park y col., 2002), papaya (El-Aouar y col., 2003), melón (Rodrigues y Fernandes, 2007). Sin embargo, el secado con microondas de productos osmóticamente deshidratados ha demostrado mejorar la velocidad de secado y retener la calidad de los productos comparado con el



secado con aire caliente (Karathanos y Kostaropoulos, 1995; Yu, 1998; Mandala y col., 2005). Venkatachalapathy y Raghavan (1998) informaron que el secado con microondas de arándanos osmóticamente deshidratados mejoró la velocidad de secado y mantuvo la calidad de los productos comparado con el secado con aire caliente de los frutos finos.

#### *1.4. Generalidades del Secado Combinado por Aire caliente-Microondas de frutas*

El secado con aire caliente es uno de los métodos más aplicados y efectivos de preservación que consiste en la remoción del agua mediante la aplicación de un flujo de aire a ciertas temperaturas y velocidades. Sin embargo, la rápida reducción de la humedad de la superficie genera un encogimiento de los productos, lo cual resulta en la reducción de la transferencia de agua y a veces, la reducción de la transferencia de calor; lo que lleva a presentar ciertas desventajas incluyendo períodos de secado muy largos y alto consumo energético.

Por otra parte, el uso de microondas en el secado de los productos se ha convertido en uno de los objetivos principales de estudio por parte de varios autores (Díaz y col., 2003; Vadivambal y Jayas, 2007), ya que permite mantener la calidad de los productos y asegura una rápida y eficiente distribución del calor en el material. En general, este método cumple con los principales requerimientos en la industria del deshidratado de alimentos: velocidad de operación, eficiencia energética, costos de operación y calidad de los productos secos (Gunasekaran, 1999). A pesar de esto, Zang y col. (2006) informaron que el secado por microondas presenta varios inconvenientes entre ellos el calentamiento desigual, daño en la estructura y limitada penetración de la radiación de microondas dentro del producto. No obstante, la extracción del agua por medio de microondas es cara en lo que respecta a altos costos de la energía eléctrica. Los dispositivos de generación de microondas (magnetrones) tienen una eficiencia en el rango de 50-60%. Además, no toda la energía emitida se intercambia como calor útil en un producto.

Para reducir estos inconvenientes, muchos investigadores (Prothon y col., 2001; Erle y Schubert, 2001; Torringa y col., 2001; Maskan, 2001; Sunjka y col., 2004; Andrés y col., 2004; Contreras y col., 2008) han estudiado el secado de productos con alto contenido de agua mediante métodos combinados.

Debido a la gran contracción del material y endurecimiento del producto causado por el secado por aire caliente, el interés en el calentamiento por medio de microondas en la industria alimenticia aumentó gradualmente. La energía de microondas es especialmente útil en el secado, ya que permite la remoción de la humedad en forma continua e intensa. Las microondas pueden penetrar a través del material seco hacia el interior causando un calentamiento en las partes húmedas e incrementar la velocidad de secado. Se ha observado que la transferencia de la humedad hacia la superficie es más dinámica que en el secado convencional. Por lo tanto, la aplicación del método combinado aire caliente-microondas permitiría reducir el tiempo de secado y costos, obteniendo un producto de alta calidad.

En los alimentos deshidratados, la pérdida de las características originales de la materia prima se manifiesta a través de la pérdida de color, textura y valor nutricional. Para la optimización de procesos ya existentes es necesario determinar la acción de los factores individuales y su interacción. Por lo tanto, en este trabajo se considera que el secado con aire caliente-microondas y la deshidratación osmótica-microondas representan alternativas interesantes para el secado de las frambuesas (var. Heritage) y de los arándanos (var. O'neal).

## 1.5. OBJETIVOS

### 1.5.1. *Objetivo general*

Comparar métodos combinados de deshidratado (deshidratación osmótica-microondas y secado por aire caliente-microondas) mediante el análisis de las propiedades físico-químicas y de calidad, permitiendo seleccionar aquel que permita obtener un producto con alto valor nutricional y estabilidad microbiológica.

### 1.5.2. *Objetivos específicos*

- Comparar diferentes combinaciones de las variables (temperatura y concentración de la solución y tiempo de proceso) de la deshidratación osmótica (DO) de frutos del bosque (arándanos y frambuesas), evaluando las cinéticas de deshidratación en términos de la disminución del contenido de agua (WC), aumento de los sólidos solubles (SS) y pérdida de peso (WR)
- Comparar diferentes combinaciones de las variables (temperatura y velocidad del aire y tiempo de proceso) en el secado por aire caliente (SAC) de frutos del bosque (arándanos y frambuesas), evaluando las cinéticas de deshidratación en términos de la disminución del contenido de agua (WC), actividad acuosa (aw) y aumento de la pérdida de peso (WR)
- Analizar el efecto de las variables de los diferentes presecados sobre las propiedades de calidad del producto intermedio (color, textura y capacidad antioxidante)
- Comparar métodos combinados de deshidratación con secado final por microondas en frutos del bosque (arándanos y frambuesas) bajo diferentes condiciones (potencia y tiempo) evaluando las cinéticas de deshidratación en términos de la disminución del contenido de agua (WC), actividad acuosa (aw) y aumento de la pérdida de peso (WR)
- Analizar el efecto de los distintos tratamientos sobre las características de calidad del producto final (color, textura, capacidad antioxidante y capacidad de rehidratación).

1.5.3. *Hipótesis*

Los métodos de secado combinado (deshidratación osmótica-microondas y secado por aire caliente-microondas) permiten obtener productos deshidratados de alto valor agregado, los cuales conservan la calidad y características nutricionales similares a las de los frutos frescos.

## *2. DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA*

## **2. DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA**

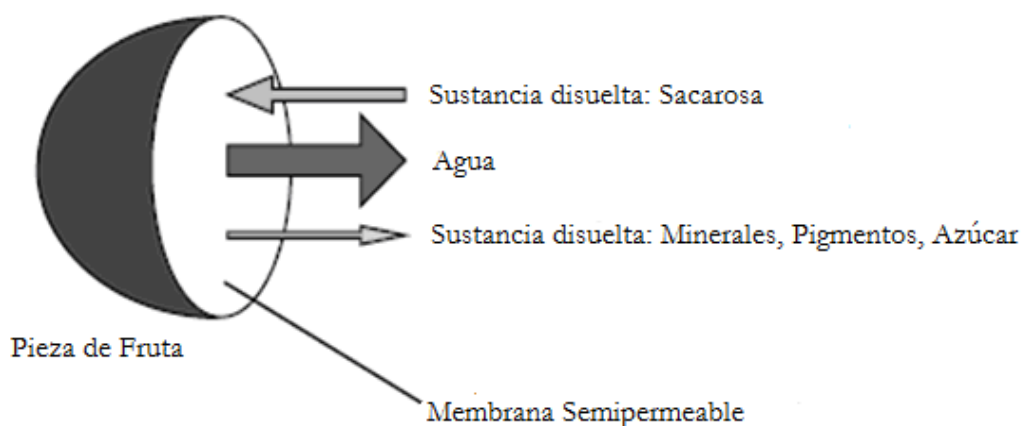
La deshidratación osmótica (DO) ha adquirido un renovado interés, principalmente como un pretratamiento en las técnicas combinadas (Torreggiani y Bertolo, 2004). La DO permite la remoción parcial del agua en los tejidos de las plantas por inmersión en una solución hipertónica (osmótica). Esta técnica, consiste en la aplicación de diferencia de potenciales químicos, generada por la solución, para la difusión del agua a partir de los tejidos hacia el exterior del fruto. Simultáneamente, por la misma causa, se produce la difusión de los sólidos de la solución en sentido contrario (Figura 3).

La velocidad de difusión del agua de los tejidos depende de factores tales como: la temperatura y concentración de la solución osmótica, el tipo de material bajo estudio, como así también de la geometría y tamaño del mismo, la relación de masa solución-fruta, el nivel de agitación de la solución y tiempo de inmersión. A su vez, se ha estudiado la aplicación de tratamientos químicos o mecánicos previos que benefician la difusión del agua durante los procesos osmóticos. Muchos autores (Raouzeos y Saravacos, 1986; Doymaz y Pala, 2002a; Doymaz, 2004; Doymaz, 2007b) han investigado en frutos con piel, el uso de emulsiones de oleato de etilo (EO) en soluciones acuosas de hidróxido de sodio (NaOH) para la remoción de las ceras. De esta manera la permeabilidad de la membrana celular aumenta permitiendo trabajar a bajas temperaturas, donde el daño térmico es despreciable. Otros autores (Rastogi y Raghavarao, 1996; Sereno y col., 2001; Moreno y col., 2004) han estudiado la aplicación de vacío. Este tratamiento ha sido descrito como la aplicación de una presión menor a la atmosférica al comienzo del proceso a cortos tiempos, generando una mayor apertura de los poros de la membrana celular.

La membrana celular de los tejidos es semipermeable y es responsable del transporte osmótico dado que ofrece una resistencia dominante durante todo el proceso. No es perfectamente selectiva, por lo que otros solutos presentes en las células también pueden ser lixiviados en la solución osmótica. La compleja estructura de los tejidos hace que la DO no pueda ser explicada como un proceso osmótico puro, sino como un proceso donde tienen lugar otros mecanismos de transporte de masa en diferentes niveles.

El uso de la DO en la industria alimentaria ha presentado varias ventajas tales como: la mejora en la calidad del fruto en términos de color, sabor, textura, retención de nutrientes y estabilidad durante el almacenamiento y desde el punto de vista económico, mejora de la

eficiencia energética y reducción de los costos en el empaquetamiento y distribución (Rahman y Perera, 1999; Sablani y col., 2002; El-Aouar y col., 2006).



**Figura 3-** Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica  
(Erle y Schubert, 2001).

Dado el fenómeno de inclusión de solutos, la DO se puede presentar como un método alternativo en la formulación de alimentos permitiendo modificar la composición del producto y en consecuencia mejorar sus propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales. Por lo general, las sustancias empleadas en la DO son azúcares como sacarosa, glucosa, alcoholes como sorbitol y xilitol y sales como el ClNa (Barbosa -Canovas y Vega-Mercado, 1996). Se ha observado que la incorporación de solutos protege la pigmentación de los frutos y vegetales, por lo que su aplicación podría eliminar la necesidad de inactivar enzimas, proceso comúnmente aplicado para eliminar problemas de oscurecimiento en los frutos y vegetales. Otras de las aplicaciones consistirían en aumentar la estabilidad durante el almacenamiento (Soto, 2002).

Como mencionamos anteriormente, el proceso de deshidratación osmótica no se considera como una operación única para la conservación de frutas y vegetales, sino una etapa de pretratamiento en operaciones como son el secado o la congelación. La actividad acuosa remanente después de la DO es muy alta, por tanto, tratamientos adicionales para reducir el contenido de agua son necesarios para lograr la estabilidad microbiológica del producto final.

Los métodos combinados conducen a la mejor preservación de los alimentos, permitiendo mantener las características organolépticas, tales como textura, sabor y color similares a la de los productos frescos, sin comprometer su integridad. El efecto aditivo y sinérgico de los factores de conservación permite preservar el alimento con una mayor calidad que si se usa una sola técnica, por ejemplo el secado (Soto, 2002). El secado combinado con microondas es una de las alternativas más estudiadas hoy en día (Venkatachalapathy y Raghavan, 1999; Erle y Schubert, 2001; Prothon y col., 2001; Torringa y col., 2001; Botha y col., 2012).

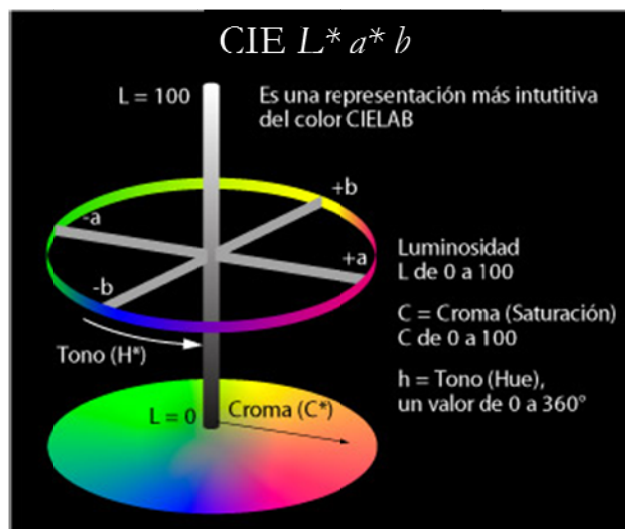
Los cambios fisicoquímicos que experimenta el alimento durante la deshidratación no solo modifican su composición nutricional, sino también sus características sensoriales. Dichos cambios se manifiestan a través de variaciones en el color, propiedades mecánicas y pérdida de compuestos antioxidantes en el alimento procesado (Wais y col., 2011).

La aceptación de un producto por parte de los consumidores depende principalmente de sus características organolépticas. El análisis de dichos parámetros durante y al final de los procesos permite mantener un control de la calidad del producto.

El color es uno de los atributos más importantes para la aceptación del producto final. La existencia de un color anormal o diferente al deseado puede originar el rechazo del producto. Muchas reacciones pueden afectar el color durante el procesamiento térmico de las frutas, como por ejemplo la degradación de pigmentos, especialmente carotenoides y clorofila, las reacciones de pardeamiento no enzimático tal como la de Maillard y la oxidación del ácido ascórbico.

El cambio de color puede ser medido y usado indirectamente para estimar el grado de avance de las reacciones mencionadas anteriormente. La medición instrumental del color se realiza mediante equipos específicos como los colorímetros, utilizando el sistema estándar internacional CIE L a b (o CIELAB) (Figura 4). Este modelo permite explicar cómo el ojo humano percibe el color mediante el uso de tres parámetros ubicados en tres ejes cartesianos. Los parámetros son L\* (luminosidad), a\* (enrojecimiento), b\* (amarillamiento). Estos índices han demostrado ampliamente ser útiles para describir los cambios de color y proveer información valiosa para el control de calidad en frutas y productos derivados (Wais y col., 2011). Otros parámetros utilizados para el análisis del color del frutos son la saturación (C\*) y tonalidad (h), los cuales son calculados mediante la relación de los parámetros a\* y b\*.





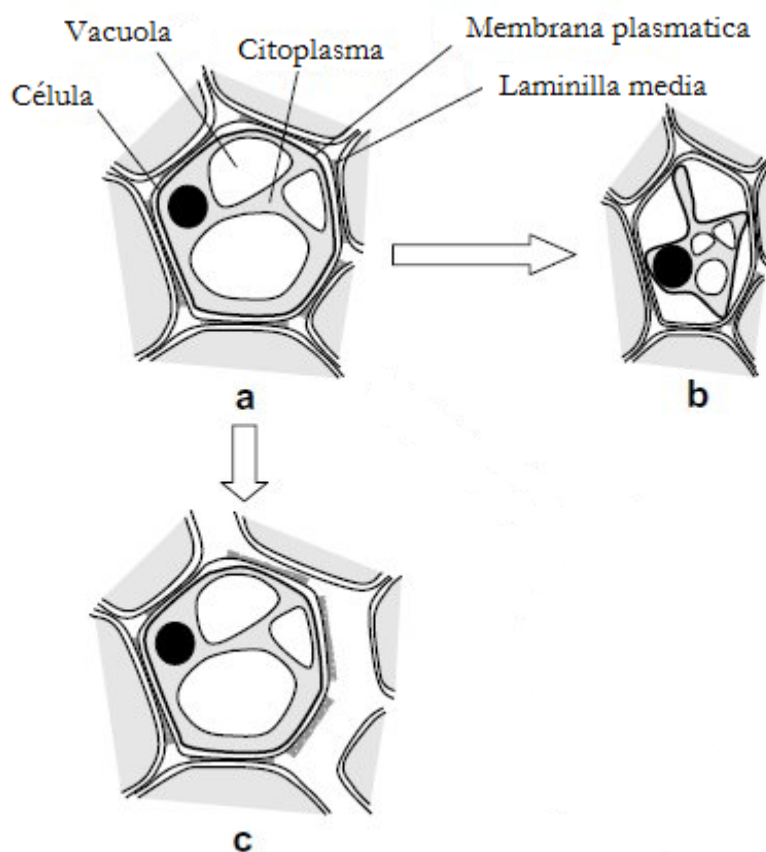
**Figura 4-** Representación del color en el sistema CIELAB.

Las propiedades mecánicas son otro atributo de la calidad organoléptica apreciado por los consumidores de frutas. La mayoría de los procesos alimentarios implican la transferencia de calor y masa en un sistema de fases en el que tienen lugar, simultáneamente, modificaciones físicas, microestructurales y macroestructurales.

Muchos aspectos de la estructura celular son afectados durante el secado de las frutas, como la alteración de la pared celular, división de la laminilla media, lisis de la membrana (plasmalema y tonoplastos), encogimiento de los tejidos, etc. (Figura 5). Estos cambios alteran fuertemente la compartimentación celular, matriz de la pared y permeabilidad de la membrana y podrían influir fuertemente en las propiedades de transporte de los productos durante el procesamiento (Nieto y col., 2004).

Cuando los frutos son sometidos a los procesos de deshidratación, el agua deja la célula generando un encogimiento de la misma, causando un desprendimiento de la membrana celular. Este fenómeno es conocido como plasmólisis y viene acompañado de la pérdida de turgencia, encogimiento y deformación celular, entre otros.

Por otra parte se ha observado también, el desprendimiento de la laminilla media o pérdida de integridad celular. Este fenómeno se debe a la degradación o desnaturalización de los componentes de la laminilla media, como así también el estrés producido en el tejido celular por la remoción del agua. Estas modificaciones tienen influencia en las propiedades mecánicas de los productos, en particular la porosidad por la formación de espacios intercelulares. (Mayor y col., 2008).



**Figura 5-** Representación de los cambios en el tejido vegetal durante la DO a) célula fresca b) encogimiento y plasmólisis, c) desunión de las células. (Mayor y col., 2008).

Desde el punto de vista nutricional, la capacidad antioxidante es uno de los parámetros utilizados para el estudio nutricional de los alimentos, permitiendo evaluar la efectividad de los procesos de secado.

El contenido de antioxidantes depende principalmente de la variedad y grado de madurez de los frutos. Luego de la cosecha, las condiciones de almacenamiento (tiempo, temperatura, atmósfera, etc.) y procesamientos (cortado, tiempo y temperaturas de tratamientos, agregado de aditivos, etc.) pueden afectar el contenido de antioxidantes naturales por la generación de ciertas reacciones en el alimento.

Las antocianinas son compuestos que se encuentran en una amplia variedad de frutas y hortalizas y son uno de los principales componentes hidrosolubles de la familia de los flavonoides que contribuyen de manera significativa en la actividad antioxidante. Actúan como inhibidores de radicales libres e interactúan con los sistemas biológicos, confiriendo inhibición en la actividad enzimática, efecto antibacterial y efectos antioxidantes (Su y

Chien, 2007). Además, este tipo de sustancias son conocidas porque aportan el color rojo, azul y violeta de las plantas.

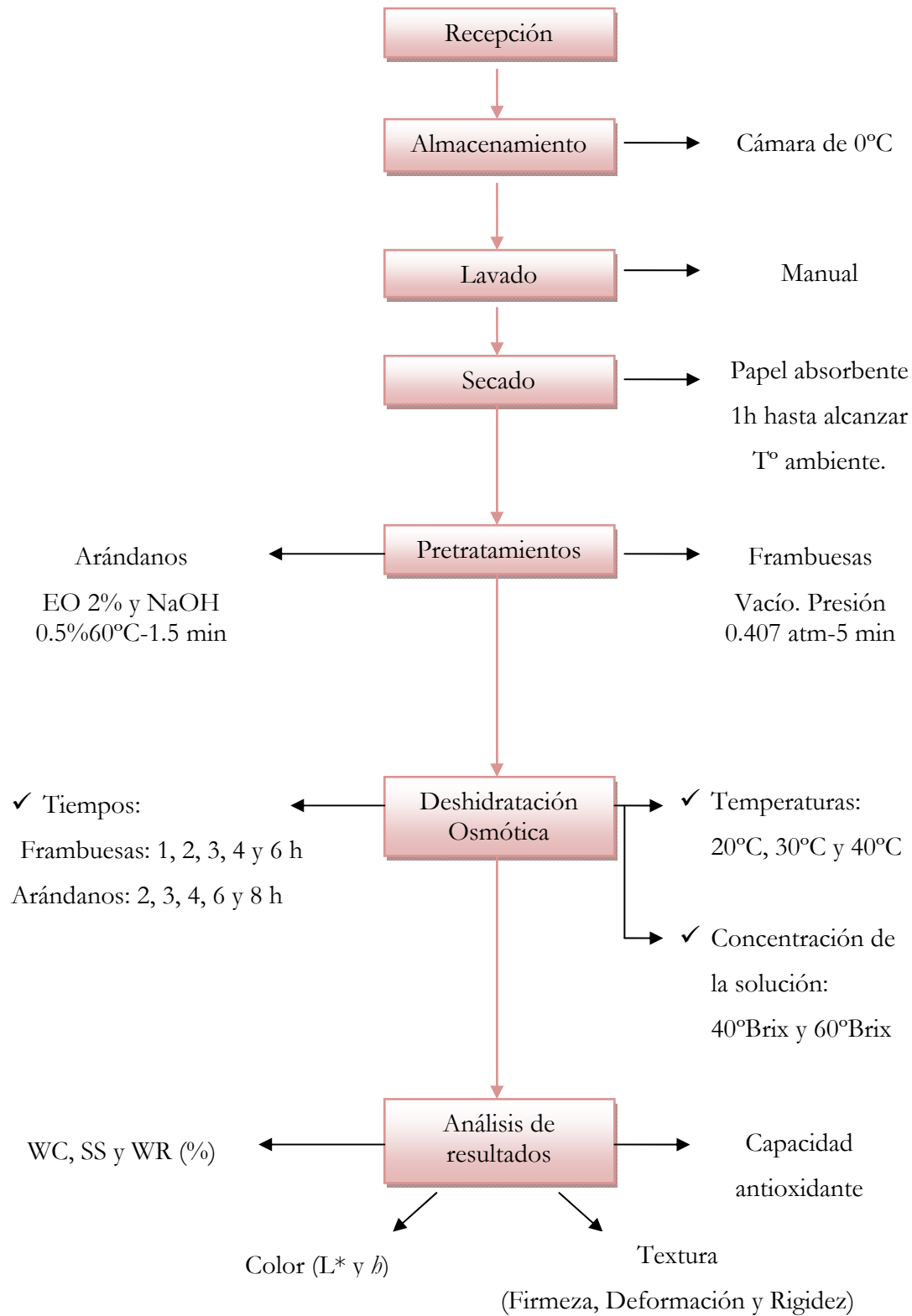
Los componentes fenólicos y polifenoles, se encuentran naturalmente en las frutas y vegetales. Estos componentes son parte de la dieta diaria y son utilizados a nivel industrial como integrantes de diversos suplementos dietarios o medicamentos. Autores como Cao y col. (1996) y Wang y col. (1996) destacan que las frutas y vegetales contienen sustancias tales como vitaminas C y E, y otras denominadas carotenoides que contribuyen significativamente a la capacidad antioxidante. Los compuestos fenólicos pueden actuar como inhibidores de radicales libres y quelantes de iones metálicos (Halliwell y col., 1995).

Tal como se describió en párrafos anteriores, el principal objetivo del procesamiento de frutas y hortalizas es preservar los alimentos. El conocimiento y la predicción de los cambios en el color, textura y pérdida o incremento del valor nutricional revisten de importancia dado que los mismos están íntimamente relacionados con la calidad del producto final. Además, dicha información es necesaria a nivel industrial para fijar las condiciones óptimas de trabajo y el diseño de equipamiento.

Por tanto, el objetivo de este capítulo fue estudiar la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de frambuesas y arándanos bajo diferentes combinaciones de variables de proceso (concentración y temperatura de la solución y tiempo), analizando la influencia de las mismas sobre los aspectos fisicoquímicos y de calidad del producto intermedio obtenido. Para evaluar la transferencia de masa, la misma se analizó a través del comportamiento de la reducción del contenido de agua (WC), pérdida de peso (WR) y aumento de los sólidos solubles (SS) en función del tiempo. La calidad del producto predeshidratado se determinó mediante la evaluación del color, textura y capacidad antioxidante.

## 2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

## 2.1.1. Diseño experimental



### 2.1.2. Preparación de las muestras

Las frambuesas utilizadas fueron de la variedad Heritage (WC: 84% (bh), SS: 11.8 °Brix), cosechadas en el momento. Los arándanos fueron de la variedad O'neal (WC: 83.5 % (bh), SS: 13.3 °Brix), de tamaño uniforme, provenientes del descarte de frutas frescas de exportación, con 1 o 2 días posteriores a su cosecha.

Las frutas se adquirieron en el Establecimiento Don Pedro en la ciudad de San Pedro, (provincia de Buenos Aires, Argentina) y se mantuvieron almacenadas en cámara de 0°C hasta su utilización. Previo a su procesamiento, se descartaron aquellas frutas que se encontraban en mal estado y las restantes se lavaron manualmente y secaron suavemente con papel absorbente.

### 2.1.3. Pretratamientos

Para lograr una mayor velocidad de difusión del agua y sólidos de la solución, en las frambuesas, al inicio de la DO, se aplicó vacío a una presión de 0.407 atm durante 5 minutos en un autosecador al vacío marca Ionomax (Industria Argentina), el cual fue adaptado para estas experiencias (Figura 6). El tiempo de pretratamiento fue seleccionado mediante pruebas preliminares donde se estudiaron diferentes tiempos de tratamientos: 5, 10 y 15 minutos (Tabla 3) y la selección de la presión fue en base a Mújica-Paz y col. (2003) donde se escogió una presión intermedia a las utilizadas por estos autores. Este pretratamiento permitió abrir los poros de las membranas y facilitar la difusión de los sólidos y el agua.



**Figura 6-** Desecador a vacío utilizado en la DO de frambuesas.

**Tabla 3-** Pruebas preliminares realizadas en frambuesas para la selección de las condiciones de pretratamientos previos a la DO.

Tiempos de pretratamiento (min)	WC (%)	SS (°Brix)
Control	71.340±1.052 <sup>a</sup>	23.400±0.490 <sup>b</sup>
5	61.176±2.459 <sup>b</sup>	33.511±2.516 <sup>a</sup>
10	63.717±4.061 <sup>b</sup>	31.233±4.202 <sup>a</sup>
15	62.737±2.169 <sup>b</sup>	32.800±1.452 <sup>a</sup>

Letras distintas indican diferencias significativas entre tiempos de pretratamiento para cada propiedad. Nivel de confianza 95%.

Los arándanos fueron sometidos a un tratamiento químico con Oleato de Etilo (EO) 2% e hidróxido de sodio (NaOH) 0.5% durante 1.5 minutos a 60°C, pasado ese tiempo se removió la solución adherida en la superficie con agua y se secaron con papel absorbente. Las condiciones de pretratamiento fueron seleccionadas mediante pruebas preliminares como muestra la Tabla 4. Las concentraciones aplicadas fueron recomendadas por Beaudry (2001).

**Tabla 4-** Pruebas preliminares realizadas en arándanos para la selección de las condiciones de pretratamientos previo a la DO.

Pruebas preliminares	WC (%)	SS (°Brix)
Control	82.770±1.006 <sup>a</sup>	15.250±0.855 <sup>a</sup>
1.5 min. 30°C	81.936±0.184 <sup>a</sup>	14.778±0.319 <sup>a</sup>
3 min. 30°C	81.556±0.410 <sup>a</sup>	15.450±1.154 <sup>a</sup>
1.5 min 60°C	75.874±1.003 <sup>b</sup>	20.944±0.915 <sup>b</sup>
3 min 60°C	78.092±2.006 <sup>b</sup>	19.211±1.630 <sup>b</sup>

Letras distintas indican diferencias significativas entre tiempos de pretratamiento para cada propiedad. Nivel de confianza 95%.

#### 2.1.4. Deshidratación osmótica (DO)

El diseño experimental aplicado en la DO comprendió 2 niveles de concentración del agente osmótico (40°Brix y 60°Brix), 3 niveles de temperaturas (20°C, 30°C y 40°C) y 5 tiempos de contacto. Los tiempos de contacto en arándanos fueron 120, 180, 240, 360 y 480 minutos y en frambuesas de 60, 120, 180, 240 y 360 minutos. Como agente osmótico se utilizó sacarosa comercial, la misma es un edulcorante natural, muy utilizado industrialmente por sus propiedades físicas, higroscopicidad relativamente baja y su estabilidad en muchos procesos alimenticios. También es un preservador efectivo contra mohos. La relación fruta/jarabe seleccionada fue 1:20, permitiendo generar una alta presión osmótica sobre el fruto y lograr una mayor transferencia de masa durante el proceso.

La DO se llevó a cabo en un agitador ó “shaker” (Figura 7), compuesto por una cámara termostatzada. Los frutos previamente pesados se colocaron en jaulas plásticas maleables, sujetas a pesas para evitar que floten y fueron sumergidas dentro de vasos precipitados plásticos (capacidad 2 litros), cargados con la solución deshidratante a la temperatura de trabajo con agitación lineal (100 ciclos por minuto). Cada tratamiento de DO se realizó por triplicado.

Una vez finalizada la DO, las muestras se escurrieron sobre papel absorbente para remover la solución adherida en la superficie del fruto y se registró el peso del producto osmotizado a los distintos tiempos. Luego se tomaron distintas fracciones de muestras para el análisis de los parámetros de calidad, que serán explicados más adelante.



**Figura 7-** Agitador orbital (Industria Argentina), para efectuar las DO.

La pérdida de peso (WR) se midió a través del peso inicial y final de cada una de las muestras tratadas osmóticamente y fue calculada mediante la ecuación (1):

$$WR = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (1)$$

Donde WR es la pérdida de peso porcentual,  $m_f$  es la masa final en gramos luego del proceso osmótico y  $m_i$  la masa inicial en gramos.

El contenido de agua (WC) fue determinado por estufa (modelo Gallenkamp, UK) a 70°C hasta alcanzar peso constante, en base al método AOAC 1980. Este parámetro fue determinado mediante la ecuación (2) en base húmeda:

$$WC = \frac{m_a}{m_i} * 100 \quad (2)$$

Donde  $m_i$  es la masa inicial,  $m_a$  es la masa de agua. Ambas expresadas en gramos.

Los sólidos solubles (SS) fueron medidos mediante un refractómetro digital para Alimentación (Hanna Instruments modelo *HI96801*, USA) a temperatura ambiente y expresados en °Brix (g de sólidos solubles/100 g de muestra).

Para cada determinación se realizaron dos mediciones por cada triplicado de la DO. A su vez, debido a la variabilidad existente entre los diferentes lotes utilizados durante este trabajo, los valores obtenidos de WC y SS fueron normalizados con la muestra fresca correspondiente, de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de agua} = \frac{WC}{WCo} \quad (3)$$

$$\text{Sólidos solubles} = \frac{SS}{SSo} \quad (4)$$

Donde WC y SS son el contenido de agua y sólidos solubles a un determinado tiempo de DO y WCo y SSo son el contenido de agua y sólidos solubles correspondientes al fruto fresco. Por otro lado, a partir de los valores normalizados del contenido de agua se calculó la velocidad adimensional aproximada para cada uno de los procesos de secado.



### 2.1.5. Determinación de las propiedades ópticas.

Las determinaciones se realizaron con un colorímetro Konica Minolta Chromameter Modelo CR 400/410, Japón (Figura 8). El instrumento fue calibrado sobre una placa reflectora blanco estándar. El sistema seleccionado para representar los valores fue el CIE  $L^* a^* b^*$ .



**Figura 8** – Colorímetro Konica Minolta Chromameter Modelo CR 400/410.

Para las determinaciones de color, se tomaron 30 frutos (10 de cada replicado) para cada uno de los tratamientos de DO y el fresco, los cálculos posteriores se realizaron considerando el promedio de las mismas.

Los parámetros analizados fueron la luminosidad ( $L^*$ ) y el ángulo de hue ( $h$ ):

$L^*$ : recibe el nombre de “luminosidad”, atributo según el cual una superficie parece emitir más o menos luz. Para superficies reflectoras o transmisoras se reserva el término de “claridad”, por la que un cuerpo parece reflejar (o transmitir) por difusión una fracción mayor o menor de la luz incidente. Puede tomar valores entre 0 (negro absoluto) y 100 (blanco absoluto).

$h$ : corresponde al “tono”, atributo que ha suscitado nombres como azul, verde, amarillo, rojo, etc. Numéricamente, también en el plano cromático  $a^*-b^*$ , es una medida angular y corresponde al ángulo de matiz definido desde el eje positivo de la coordenada  $a^*$ , que varía entre 0 y 360°. Este parámetro fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (5)$$

Los valores informados fueron normalizados utilizando como valor de referencia al fruto fresco correspondiente, a través de las ecuaciones:

$$\frac{L^*}{L_o^*} \quad (6)$$

$$\frac{h}{h_o} \quad (7)$$

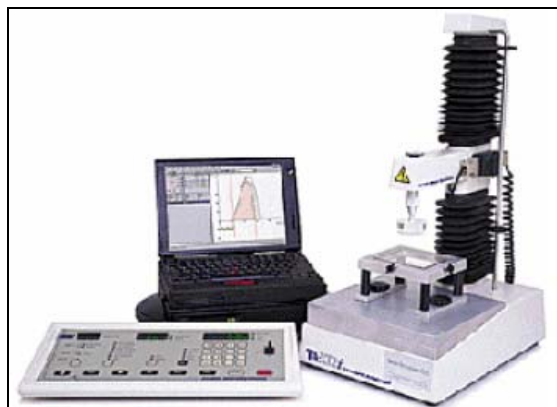
Donde  $L^*$  y  $h$  corresponden a las muestras pretratadas con DO (promedio de las 30 mediciones) y  $L_o^*$  y  $h_o$  corresponden a las muestras frescas correspondientes (valor promedio de las 30 mediciones).

### 2.1.6. Determinación de las propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico puede ser interpretado por medio de la medida de ciertos parámetros físicos a través de la prueba de compresión o test de ruptura llevada a cabo mediante un texturómetro; en nuestro caso el Universal Testing Machine, modelo TATX2i marca Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra (Figura 9).

En la determinación de textura de frambuesas se aplicó una prueba de compresión. Se utilizó un disco de acrílico sobre el que fueron dispuestos tres frutos y con una sonda de acrílico de 4.5 cm de diámetro eran comprimidos. La velocidad de compresión fue de 0.3 mm/s. Se realizaron 4 mediciones para cada triplicado, por lo tanto en cada medición se tomaron 12 frutos.

En arándanos se empleó el ensayo de ruptura, para lo cual se utilizó una sonda SMSP/3 de 3 mm de diámetro a una velocidad de penetración de 0.5 mm/s hasta penetrar un 30% de la muestra, este porcentaje fue seleccionado con el fin de evitar llegar a la semilla del fruto. Se realizó a temperatura ambiente (25°C) y se midieron 12 frutos para cada triplicado.



**Figura 9-** Analizador de Textura TATX2I.

Los parámetros analizados fueron los siguientes, según lo descrito por Vargas y col. (2001), (Figura 10):

*Fuerza Máxima (F)*: definida como el valor de la fuerza medida en Newton (N) necesaria para producir la fractura de la superficie del fruto, en el punto máximo que alcanza la curva que corresponde al punto de ruptura.

*Pendiente o Rigidez (P)*: corresponde a la pendiente de la curva de fuerza-deformación medida en N/mm desde el origen al punto de ruptura o fuerza máxima.

*Deformación (D)*: establecida como la distancia que recorre el émbolo del texturómetro hasta el momento de la ruptura del fruto, expresada en mm.

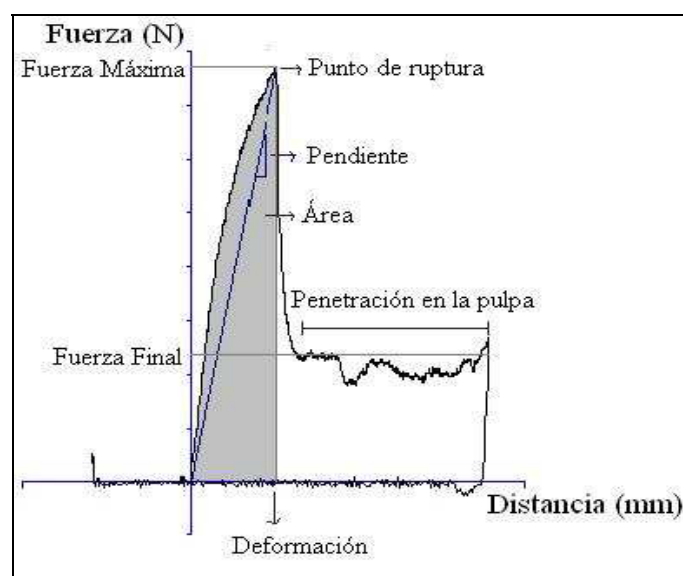
Los valores obtenidos fueron normalizados con respecto al fresco de la siguiente manera:

$$\text{Firmeza: } \frac{F}{F_o} \quad (8)$$

$$\text{Rigidez o pendiente: } \frac{P}{P_o} \quad (9)$$

$$\text{Deformación: } \frac{D}{D_o} \quad (10)$$

Donde F, P y D son los valores correspondiente a la fuerza máxima, pendiente y distancia de los frutos a un determinado tiempo de tratamiento y Fo, Po y Do es correspondiente al fruto sin deshidratar.



**Figura 10-** Descripción de las variables medidas en la curva de fuerza-deformación como parámetros de textura: Fuerza Máxima al punto de ruptura de la piel del fruto, Rigidez o Pendiente al punto de ruptura, Deformación (Vargas y col., 2001).

### 2.1.7. Evaluación de la capacidad antioxidante

Los diferentes compuestos antioxidantes pueden actuar a través de varios mecanismos, en consecuencia, no resultaría conveniente utilizar un solo método para evaluar plenamente la capacidad antioxidante de los alimentos (Pellegrini y col., 2003). Por esta razón, dos ensayos con diferentes enfoques y mecanismos han sido llevados a cabo. El ABTS<sup>+</sup> y el radical DPPH, métodos muy utilizados para determinar la capacidad antioxidante.

#### 2.1.7.1. Determinación DPPH

Muestras de 1 g de fruto se procesaron en 10ml de etanol y la mezcla se centrifugó a 11000 RPM a 4°C. Alícuotas del extracto etanólico (10 a 50 microlitros) se adicionaron a tubos conteniendo 1 ml de 2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazyl (DPPH) 0.050 g/l en etanol preparado diariamente. Se midió la absorbancia a una longitud de onda de 515 nm, luego de 1 hora de reacción, con un espectrofotómetro Hitachi modelo U-1900 (Inglaterra) y se determinó la cantidad de extracto necesario para reducir la concentración inicial de DPPH en un 50%, cantidad que se definió como EC<sub>50</sub>. Las determinaciones se realizaron por duplicado para arándanos y por triplicado en frambuesas. El poder antioxidante se expresó como 1/EC<sub>50</sub> (n) (valor normalizado).

#### 2.1.7.2. Determinación por ABTS<sup>+</sup>

Para formar el radical estable ABTS<sup>+</sup> se prepararon 5 ml de ABTS<sup>+</sup> 7mM con persulfato de potasio 2.45 mM en agua destilada y se dejó incubar en oscuridad por 16 h a temperatura ambiente, con agitación. Una vez formado el radical, la solución se diluyó con etanol hasta obtener una absorbancia de  $0.700 \pm 0.5$  medida a 734 nm en el espectrofotómetro descrito previamente. Antes de la medición, los extractos fueron diluidos en una relación tal que permitiera estar dentro del rango de trabajo, ya que al trabajar con frutos de diferentes lotes en cada replicado, dicha dilución dependía del mismo. El poder anti-radical se evaluó en las muestras preparadas por adición de 20 µl de extracto a 1000 µl de reactivo ABTS<sup>+</sup>. Luego de dejar cursar la reacción por 6 min con agitación constante, se midió la absorbancia a 734 nm. La medida resulta válida cuando se obtiene entre un 20-80% de inhibición, comparada con la absorbancia de un blanco preparado con 20 µl de etanol y 1000 µl de ABTS<sup>+</sup> (sin extracto). Las determinaciones se realizaron por duplicado en arándanos y por triplicado en

frambuesas. Soluciones etanólicas de Trolox con concentraciones conocidas fueron utilizadas para la calibración de los resultados y expresadas como mg de Trolox/g materia seca.

Cabe destacar que todos los valores obtenidos fueron normalizados con respecto al fresco debido a la perecibilidad de las frutas, lo que llevó a que se trabajaran con diferentes lotes para cada replicado. La vida útil de los arándanos frescos fue alrededor de 21 días y las de las frambuesas de 5 días, almacenados en cámara de 0°C en recipientes herméticos.

#### *2.1.8. Análisis Estadístico*

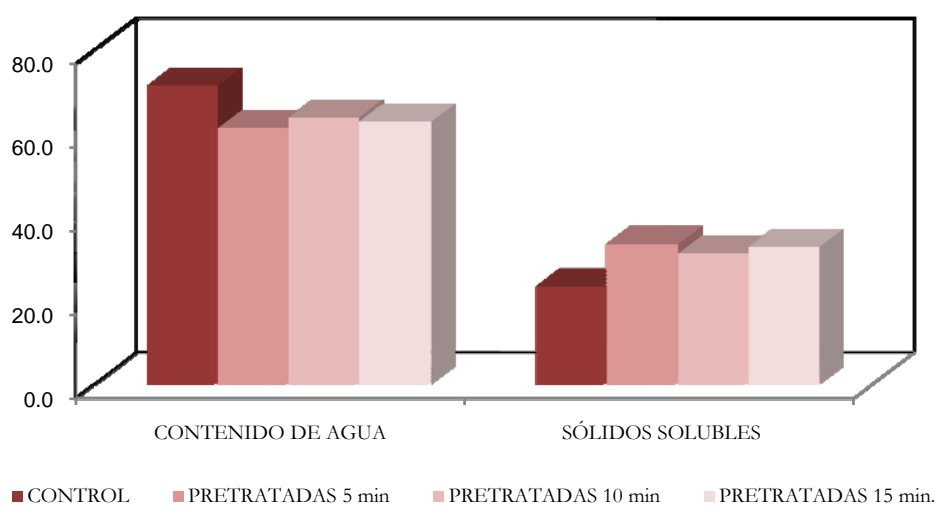
Se realizó un análisis de Varianza para determinar el efecto de las condiciones de proceso en los arándanos y frambuesas. Para dicho análisis se utilizó el software SYSTAT versión 12. Aquellas variables de proceso y sus interacciones que presenten un  $p < 0.05$  indican que los mismos tuvieron efectos significativos sobre los frutos. La comparación de medias se realizó mediante un análisis de Tukey al 95% de nivel de confianza. Diferencias significativas se encontraban con  $p < 0.05$ .

## 2.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### FRAMBUESAS

#### 2.2.1. Pretratamiento

La aplicación de vacío al inicio de la DO permitió lograr una mayor tendencia en la reducción del contenido de agua (WC) e incremento de sólidos solubles (SS) comparado con los tratamientos realizados a presión atmosférica. En la Figura 11 se muestran el WC y el de SS de muestras pretratadas con vacío, al cabo de 6h de deshidratación osmótica, observándose diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto a las muestras sin tratar. Castelló y col. (2010) emplearon una metodología similar a la descrita en el deshidratado de frutilla y encontraron resultados similares. Otros estudios han demostrado que la aplicación de vacío a cortos tiempos ha tenido efectos beneficiosos durante la cinética del proceso de DO de muchas frutas (Allali y col., 2010; Bórquez y col., 2010).



**Figura 11-**Comparación de las muestras tratadas con vacío y sin tratar luego de la deshidratación osmótica de frambuesas.

### 2.2.2. Deshidratación Osmótica

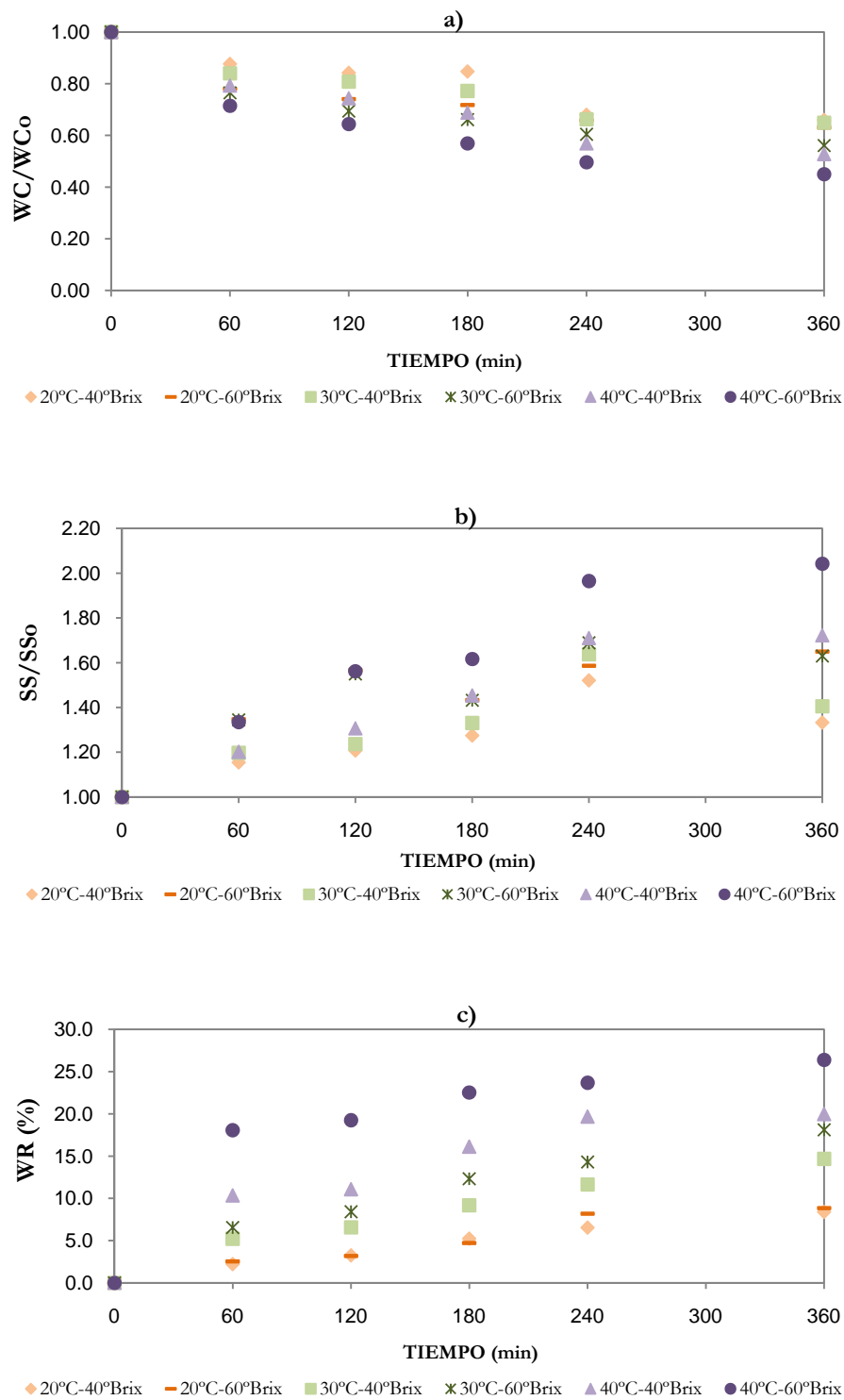
En la deshidratación osmótica (DO) el agua y otros componentes solubles difunden hacia el exterior del fruto mientras que el azúcar de la solución ingresa. Por esa misma razón, tal como se describió en la sección 2, la composición y el peso de los frutos cambian continuamente a lo largo del proceso (Ketata y col., 2013).

El efecto de las variables de proceso fue analizado durante el procesamiento de DO en términos de reducción del WC, aumento de la WR y SS en función del tiempo, como se muestran en las Figuras 12a-b-c. En las mismas se observan que los flujos de agua y sólidos solubles presentaron similares intensidades. Telis y col. (2004) reportaron el efecto del tiempo en la reducción del contenido de agua y aumento de sólidos solubles durante la deshidratación osmótica de tomates. Dichos autores indicaron que las modificaciones estructurales de los tejidos, principalmente en la membrana celular, eran la causa del fenómeno previamente mencionado como consecuencia del tiempo de contacto con la solución osmótica.

Por otro lado, es evidente que para todos los tiempos de DO, la concentración y temperatura de la solución tuvieron efectos significativos sobre los frutos. La solución de sacarosa más concentrada (60°Brix) removió mayor cantidad de agua en comparación a la menos concentrada (40°Brix) y a medida que la temperatura aumentaba de 20°C a 40°C, la disminución del WC fue más pronunciada (Figura 12a). En la Figura 12b, los sólidos solubles mostraron un incremento gradual cuando la concentración y temperatura de la solución era mayor. Resultados similares fueron reportados por otros investigadores que llevaron adelante estudios con diferentes tipos de frutas (Shi y col., 1995; Mújica-Paz y col., 2003; Shi y col., 2009).

Autores como Shi y col. (2009) destacaron que puede alcanzarse una mayor rapidez en la infusión de azúcar y disminución del WC trabajando con altas temperaturas y concentraciones elevadas de soluciones osmóticas. Por otra parte, Pereira y col. (2006) propusieron que el aumento de la difusión del agua y soluto, previsto por la alta concentración de azúcar, puede atribuirse a la mayor diferencia de presión osmótica entre el fruto y la solución hipertónica.





**Figura 12-** Cinéticas de la deshidratación osmótica de frambuesas en términos de  
a) disminución del WC, b) aumento de los SS y c) aumento de la WR.

Un estudio similar llevado a cabo por Torres y col. (2007) demostró que si bien un mayor número de estructuras celulares son afectadas por el tratamiento osmótico, los cambios provocados en ellos son menos intensos en muestras tratadas con soluciones menos concentradas (20%-40%) que cuando se utilizan soluciones osmóticas altamente concentradas (60%-85%).

A su vez, el efecto del aumento de la temperatura en la solución altamente concentrada hace que su viscosidad disminuya, resultando en una mayor velocidad de difusión del agua y soluto. Kaymak-Ertekin y Sultanoglu (2000) investigaron el efecto de la temperatura en la cinética de DO en frutas y hortalizas reportando resultados similares.

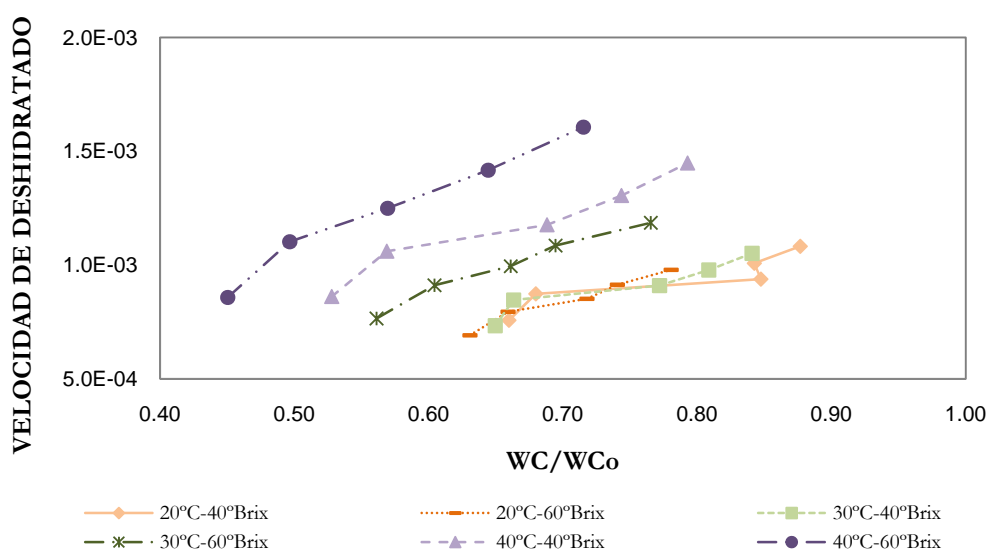
En la Figura 12c, se presenta la evolución de la pérdida de peso (WR) durante el deshidratado osmótico. Este parámetro es consecuente de la eliminación del agua y aumento de los sólidos solubles y es la causa de la reducción de volumen y deformación de los frutos. Si bien durante la DO hubo una remoción de agua significativa, a medida que las condiciones de proceso eran más severas, se pudo observar también que las tendencias de las curvas se debían a la desintegración de algunos frutos dentro de los recipientes donde se encontraba la solución con los frutos inmersos. En todas las experiencias realizadas, se pudo observar que al final de cada tiempo se encontraban sobrenadando en la solución semillas o parte de algunos frutos que se desintegraron, siendo mayor la WR cuanto mayor era el tiempo y más severas eran las condiciones de proceso. El análisis estadístico determinó que la temperatura fue el factor más influyente y sus interacciones con el resto de las otras variables fueron significativas para la WR.

Otras de las mediciones realizadas durante este trabajo fue la determinación de la velocidad de deshidratado aproximada, a partir de las curvas WC/WCo vs Tiempo (Figura 12a) donde se obtuvieron las ecuaciones exponenciales y se calculó la derivada de cada una de ellas.

En la Figura 13 se muestran los comportamientos de las curvas de velocidad de deshidratado adimensional en función del contenido de agua bajo todas las condiciones aplicadas. La mayor velocidad de deshidratado al inicio del proceso, podría deberse a la aplicación de vacío en los primeros 5 minutos de DO donde se logra una mayor apertura de los poros de la membrana celular de los frutos y por consiguiente una gran liberación de agua, resultados concordantes con Shi y col. (1995) quienes compararon la DO a presión atmosférica y vacío, obteniendo mejores resultados con la aplicación de vacío.

A su vez, independientemente de las condiciones utilizadas, se observó que la velocidad de deshidratado fue disminuyendo levemente durante el transcurso del proceso. Este comportamiento puede atribuirse a un menor efecto de la presión osmótica a medida que el tiempo de proceso avanza, lo cual hace que el agua no sea eliminada fácilmente.

En las muestras tratadas con la temperatura más baja (20°C), se pudo ver que el comportamiento de deshidratado fue similar al de las muestras tratadas a 30°C pero con la menor concentración (40°Brix). Bajo las otras condiciones, la velocidad se incrementó a medida que la temperatura y concentración aumentaron.



**Figura 13-** Curvas de velocidad durante la deshidratación osmótica de frambuesas bajo las diferentes condiciones estudiadas.

### 2.2.3. Evaluación de las propiedades ópticas

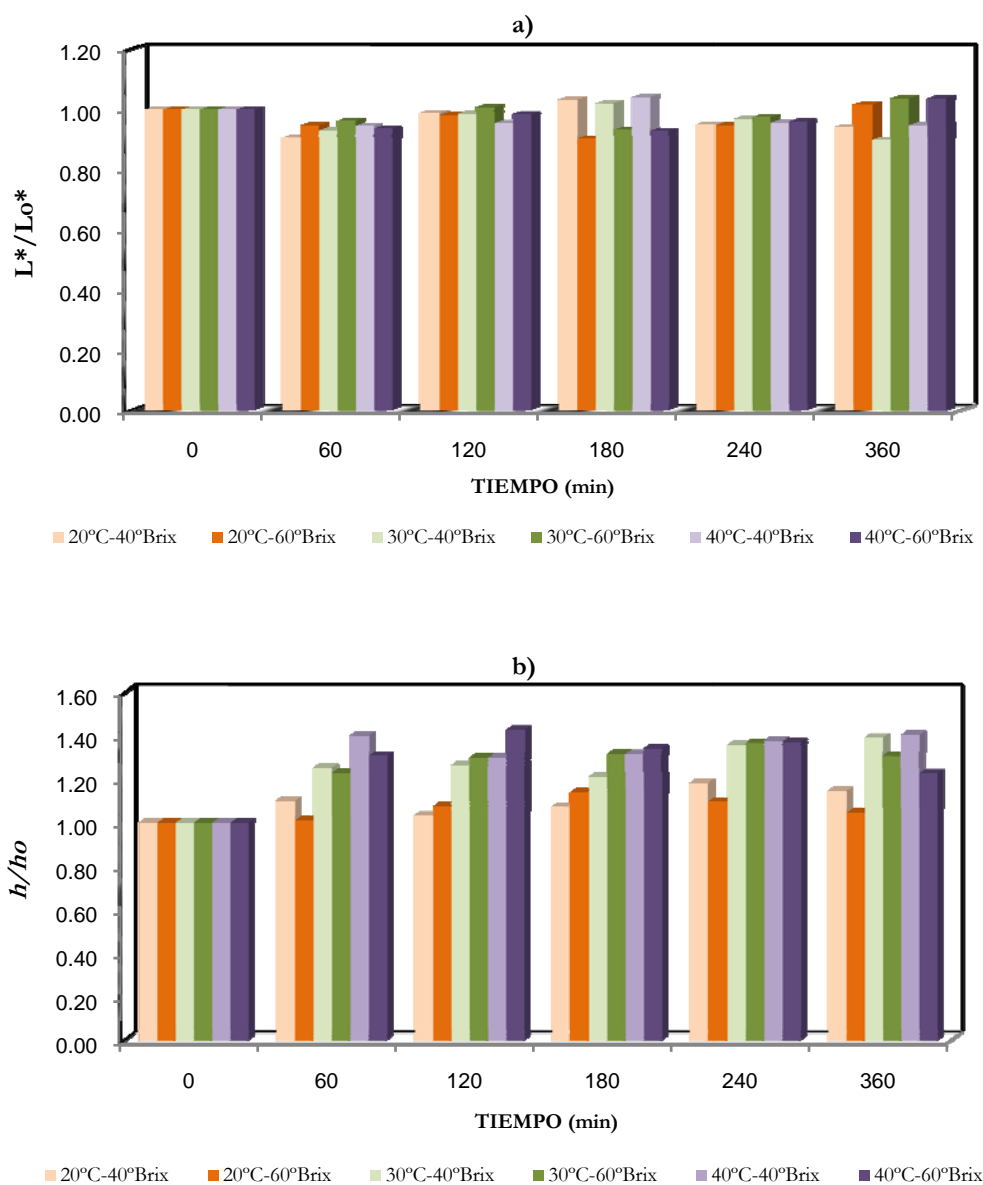
Cambios indeseables en el color pueden conducir a una disminución en la calidad y rechazo del producto por parte de los consumidores. A lo largo de los diferentes procesos la pérdida de color en las muestras es uno de los cambios más significativos. Por lo tanto, durante la deshidratación osmótica (DO) el color de los frutos fue medido antes y después del procesamiento.

Al comparar las muestras osmotizadas con respecto a los frutos frescos (Figura 14a), se encontró una disminución del parámetro  $L^*/Lo^*$  (oscurecimiento) manteniéndose constante a lo largo de los tratamientos osmóticos. Cuando se analizaron estadísticamente los efectos de las variables, se observó que el tiempo fue el único factor influyente sobre este parámetro. Sin embargo, al comparar las medias solo hubo diferencias significativas con respecto al fresco pero no entre los distintos tiempos de DO. Estos resultados son concordantes con Castelló y col. (2010) quienes reportaron que la disminución de la luminosidad encontrada por ellos fue significativa por la aplicación de impulsos de vacío e insignificante por el efecto de la deshidratación osmótica.

Por otro parte, el parámetro  $b/b_0$  aumentó en la primera hora de DO y se mantuvo constante a lo largo del proceso. Este incremento significó que el ángulo tuvo un corrimiento hacia un color más rosado en el esquema de CIELAB, presentado en la sección 2. A su vez, en la Figura 14b logramos ver el efecto de la temperatura ( $p < 0.05$ ) sobre el  $b/b_0$ . A medida que la temperatura de la solución aumenta, para cada tiempo en general, el parámetro  $bue$  presenta una mayor modificación en sus valores. Al deshidratar a una temperatura de 40°C, los pigmentos (antocianinas) en la superficie de los frutos fueron liberados con más facilidad, provocando una decoloración de los mismos. Esto también pudo comprobarse visualmente, ya que al final de cada tratamiento las soluciones pasaron de tener un color caramelo a color rojo. Un resultado similar fue informado por Moreno y col. (2012) quienes realizaron sus estudios en frutillas.

En forma similar, diversos autores (Forni y col., 1997; Pereira y col., 2006; Wais y col., 2011) reportaron que la variación del WC y SS durante la DO afecta la apariencia de los frutos, es decir, a medida que el contenido de agua disminuía y aumentaba el contenido de sólidos solubles en los frutos, los parámetros de color eran notoriamente afectados.

Durante este trabajo esta relación no pudo ser apreciada, si bien el contenido de agua y sólidos solubles fue modificándose a medida que el tiempo de DO avanzaba, los parámetros de color no presentaron el mismo comportamiento ya que las modificaciones presentadas fueron en la primera hora de DO y se mantuvieron constantes a lo largo del proceso.



**Figura 14-** Cinéticas de los parámetros de color analizados durante las DO de frambuesas

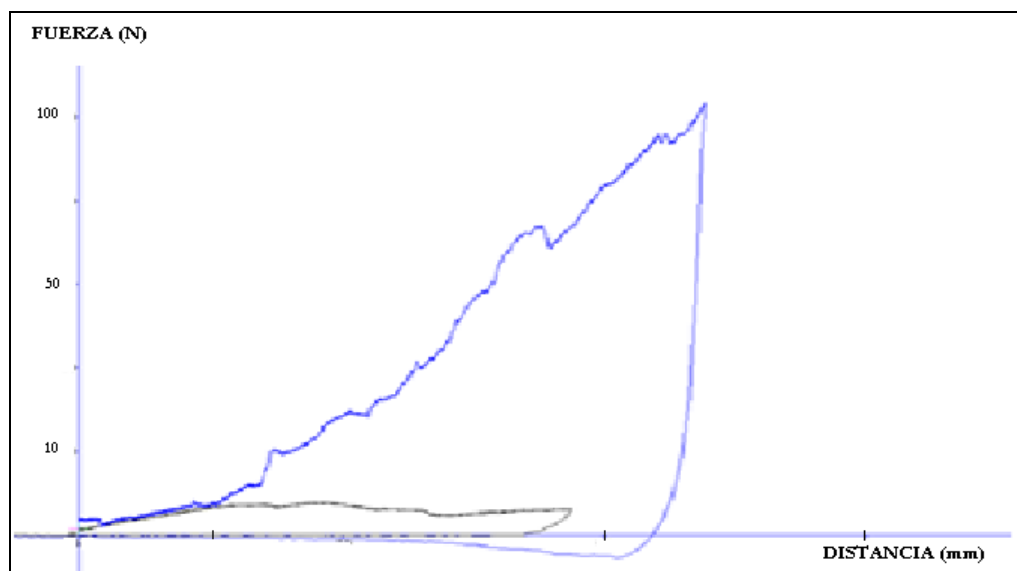
a)  $L^*/Lo^*$  y b)  $h/ho$ .

Al analizarse estadísticamente los parámetros de color, la interacción temperatura-tiempo fue significativa, concluyendo que la magnitud de una de estas variables influyó sobre la otra. A su vez, si bien la concentración no fue un factor significativo por sí solo, su interacción con el tiempo sí lo fue. A tiempos largos de procesamiento, la cantidad de solutos en la solución influyó sobre la membrana celular generando modificaciones en ella, lo que llevó a obtener un fruto más decolorado. El análisis de medias reveló que la temperatura de 20°C presentó diferencias significativas con respecto a las otras temperaturas, generando una menor decoloración de los frutos. Las diferencias de los parámetros de color reportadas son con respecto al fruto sin tratar osmóticamente.

#### 2.2.4. Evaluación de las propiedades mecánicas

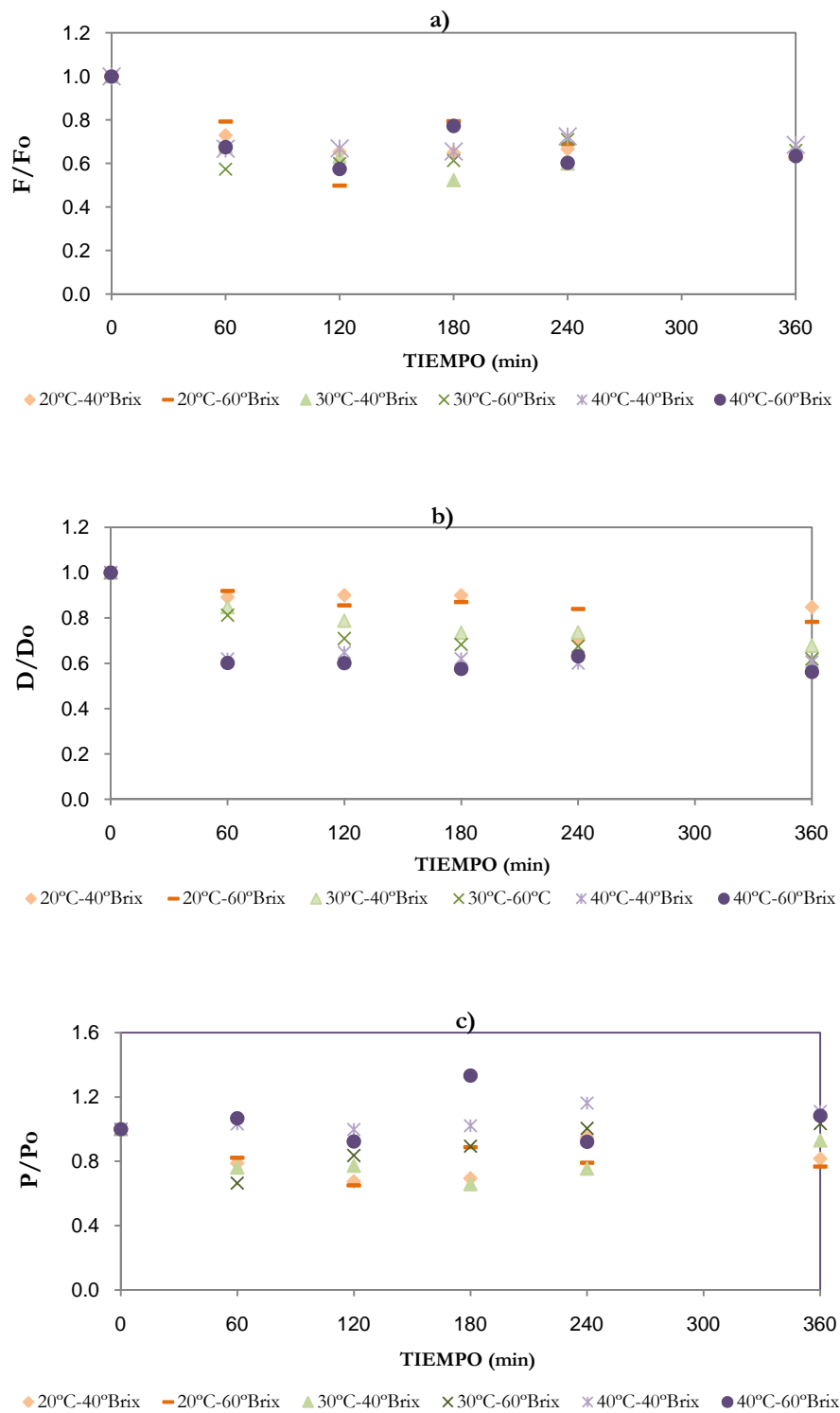
El patrón general de los tejidos de las plantas en las respuestas mecánicas muestra inicialmente una relación lineal tensión-deformación o respuesta elástica, hasta un nivel de deformación en el cual la tensión cae como consecuencia de la fractura o corte de las muestras, la cual depende principalmente de la presión de turgencia de los tejidos y del modo de corte durante la compresión: la separación o ruptura celular (Chiralt y Talens, 2005).

Con el fin de estudiar la influencia de los tratamientos sobre las propiedades mecánicas de las muestras, las curvas fuerza-distancia fueron obtenidas a partir del ensayo de compresión. En la Figura 15 podemos apreciar, a modo de ejemplo, dos tipos de curvas obtenidas en el análisis de textura de las frambuesas y arándanos.



**Figura 15**-Curvas del comportamiento mecánico de los frutos, curva color azul de las frambuesas mediante el test de compresión y curva de color negro de los arándanos mediante el test de ruptura.

Las propiedades mecánicas fueron analizadas en términos de firmeza, deformación de las muestras frente a una fuerza de compresión y rigidez hasta el punto de ruptura en función del tiempo (Figura 16).



**Figura 16-** Cinéticas de las propiedades mecánicas analizadas durante las DO de frambuesas a)  $F/F_o$ : Firmeza, b)  $D/D_o$ : Deformación y c)  $P/P_o$ : Rigidez.



Durante el procesamiento osmótico, la firmeza fue uno de los atributos más sensibles frente a las condiciones aplicadas. Este comportamiento se representa en la Figura 16a donde se ve claramente una disminución progresiva hasta las primeras 2 horas y luego de esto, se presenta una tendencia constante hacia el final. Un comportamiento similar se registró en la deformación de las muestras (Figura 16b). La temperatura de la solución fue el único factor influyente sobre estas propiedades, donde las mismas presentaban mayor modificación cuando la temperatura se incrementaba de 20°C a 40°C. El análisis de medias determinó que la temperatura que mayor influencia tuvo sobre la deformación y firmeza de los frutos fue 40°C, siendo los frutos más blandos con respecto al fresco. En cuanto a los valores de rigidez de las muestras (Figura 16c), no se observaron tendencias claras con relación a las variables de proceso testeadas.

Anteriormente mencionamos que la deformación es una propiedad estructural que mide la resistencia a la ruptura de las muestras frente a una fuerza. En este trabajo, la menor deformación permitió determinar que las muestras presentaron menor resistencia a la ruptura por el ablandamiento sufrido durante el procesamiento (Figura 16a). En concordancia con lo informado por varios autores (Lewicki y Lukaszuk, 2000; Chiralt y col., 2001; Prinzivalli y col., 2006) existe una relación directa entre el ablandamiento y los factores químicos y enzimáticos, tales como la disolución de la protopectina, la pérdida de la presión de turgencia en las células y la degradación de la laminilla media inducida por los procesos de deshidratación osmótica.

Prinzivalli y col. (2006) analizaron la composición péctica durante la deshidratación osmótica de frutillas y encontraron que la disminución de la textura y por consiguiente, los cambios estructurales consistían en la pérdida de la conexión entre las células, detectadas durante las primeras horas de ósmosis. Esta pérdida de la estructura celular pudo deberse a la solubilización de las pectinas quelante solubles las cuales, de acuerdo a la literatura, representan uno de los mayores contribuidores de la adhesión intercelular y la firmeza vinculada a la laminilla media.

### 2.2.5. Evaluación de la capacidad antioxidante

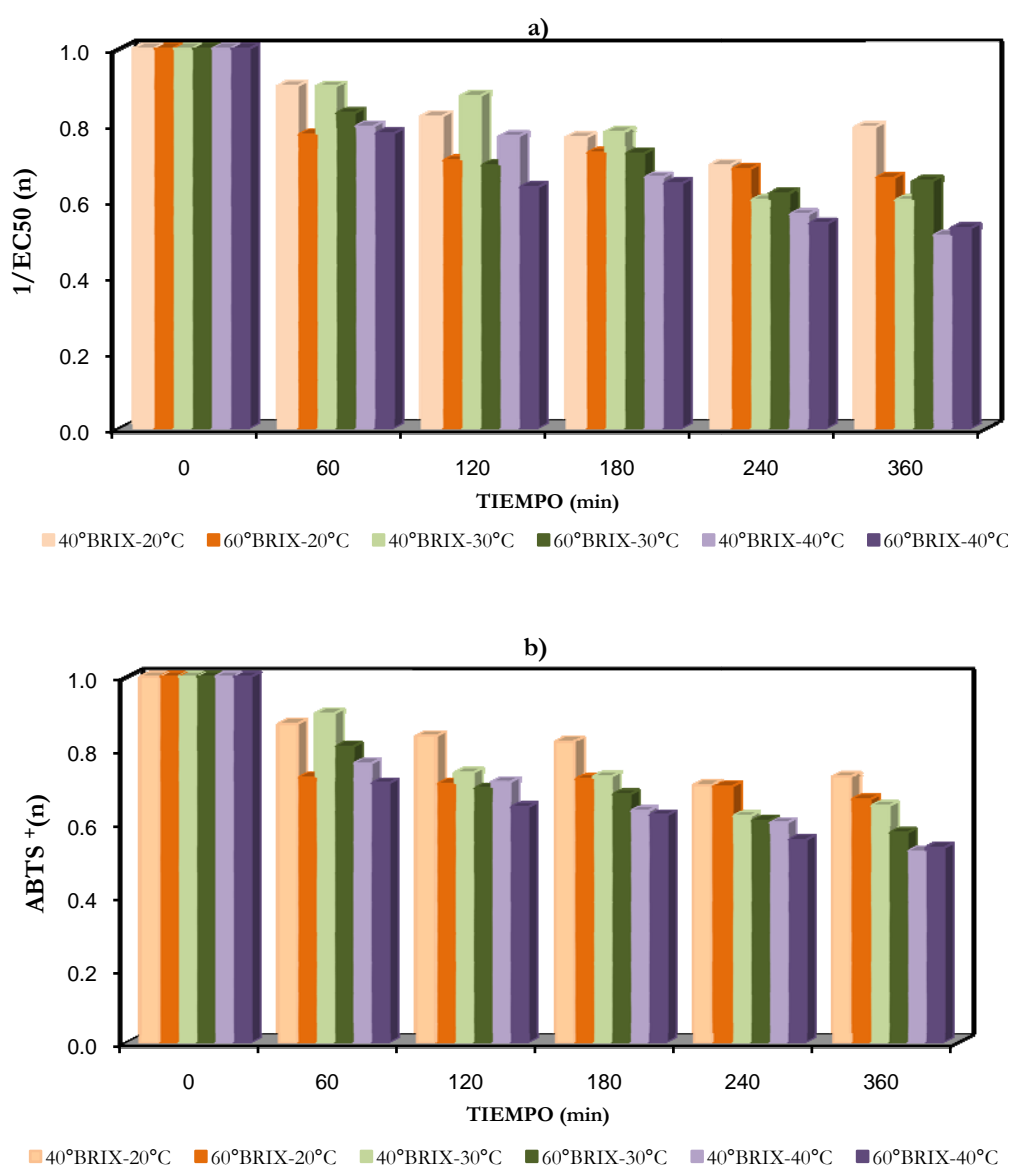
La calidad nutricional de los frutos procesados fue asociada con la capacidad antioxidante (CA) aportada por la mezcla de compuestos fenólicos y antocianinas que se encuentran en ellos. Diversos trabajos hallados en bibliografía (Frankel y Meyer, 2000; Kalt y col., 2001; Stojanovic y Silva, 2007; Laguerre y col., 2007) concuerdan en que la CA de los alimentos está determinada por una mezcla de compuestos con propiedades antioxidantes con diferentes mecanismos de acción, entre los cuales puede haber interacciones sinérgicas. Es por esto que se recomienda que el análisis de la CA, tanto en el producto fresco como en los procesados, se realice mediante dos o más métodos. En este trabajo fueron utilizados los métodos DPPH y ABTS<sup>+</sup>, ambos relacionados con la actividad anti-radicalaria.

En los procesos osmóticos, los componentes antioxidantes pueden ser afectados por las diferentes variables de proceso y sus contenidos pueden cambiar ya sea por transformaciones químicas y bioquímicas (enzimáticas e hidrolíticas, etc.) o por lixiviación en las soluciones concentradas (Blanda y col., 2009).

En ninguno de los casos la disminución de la humedad causó la concentración de los componentes antioxidantes presentes en el material fresco (Figuras 17a-b). Al observar las cinéticas de la reducción del WC, se pudo determinar que la disminución de la CA presentó el mismo comportamiento en función del tiempo, indicando así que la pérdida de los compuestos antioxidantes se debió a la remoción del agua y solutos desde el fruto hacia la solución circundante. Al final de cada tratamiento, la intensidad del color rojo en la solución aumentaba cuanto mayor era el tiempo y temperatura de DO, producto de la gran pérdida de antocianinas (pigmentos naturales) que sufrieron los frutos. Esto lleva a considerar que la disminución de la CA puede deberse a la pérdida de las antocianinas, ya sea por lixiviación o degradación térmica. Stojanovic y Silva (2007) reportaron que aunque los fenoles totales contribuían en gran medida a la actividad antioxidante, la disminución de las antocianinas afecta negativamente la capacidad antioxidante del fruto. Kalt y col. (2001), quienes trabajaron en productos de arándanos Lowbush procesados también concluyeron que las antocianinas pueden hacer una mayor contribución de la actividad antioxidante que los compuestos fenólicos.

En las Figuras 17a-b se muestran las cinéticas de la variación de la capacidad antioxidante en función del tiempo obtenidas por ambos métodos de análisis, mostrando tendencias

similares. Durante los diferentes tratamientos, la solución de menor concentración permitió una mayor retención de los compuestos antioxidantes. Por otra parte a medida que la temperatura de la solución incrementaba, la degradación de estos compuestos era mayor. El análisis estadístico determinó que todos los factores de proceso fueron influyentes. Al analizar las medias, se observó que deshidratar a 40°C con la mayor concentración de la solución y tiempos de procesamiento elevados, genera un efecto negativo sobre las propiedades antioxidantes (antocianinas y fenólicos) en los frutos.

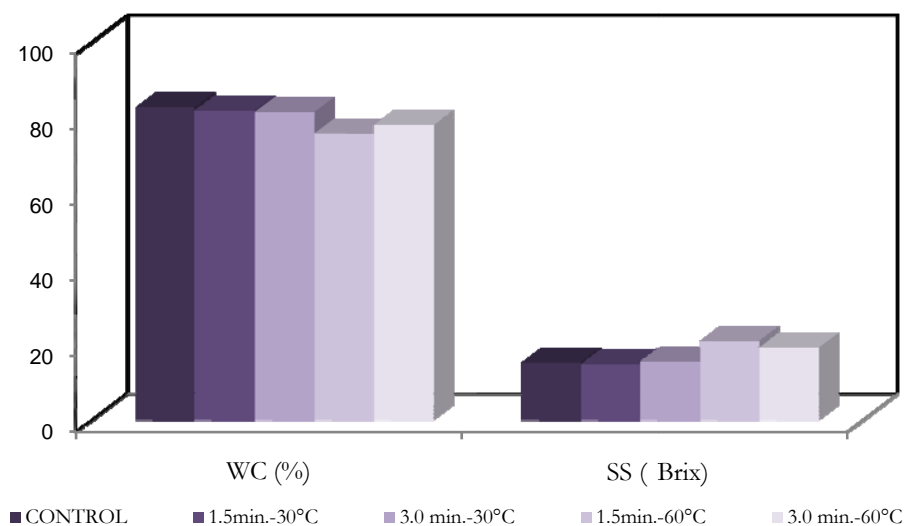


**Figura 17-** Cinéticas de la capacidad antioxidante durante las DO de frambuesas analizadas por a)  $1/EC_{50}(n)$  y b)  $ABTS^+(n)$ .

## ARÁNDANOS

## 2.2.6. Pretratamiento

Pruebas preliminares realizadas bajo las condiciones de deshidratación osmótica 40°C-60°Brix-8h, demostraron que el tratamiento químico aplicado sobre la piel de los arándanos permitió una mayor disminución del WC y aumento de SS con respecto a los frutos sin tratar (Figura 18). Esto comprueba que el oleato de etilo (EO) junto con NaOH permite lograr una mayor permeabilidad en la piel del fruto. Efectos similares han sido encontrados en estudios previos realizados en frutas (Raouzeos y Saravacos, (1986) en pasas; Doymaz, (2004) en damasco). Las condiciones seleccionadas que permitieron una mayor difusión del contenido de agua luego de 8 h de DO fueron: 1.5 min a 60°C.



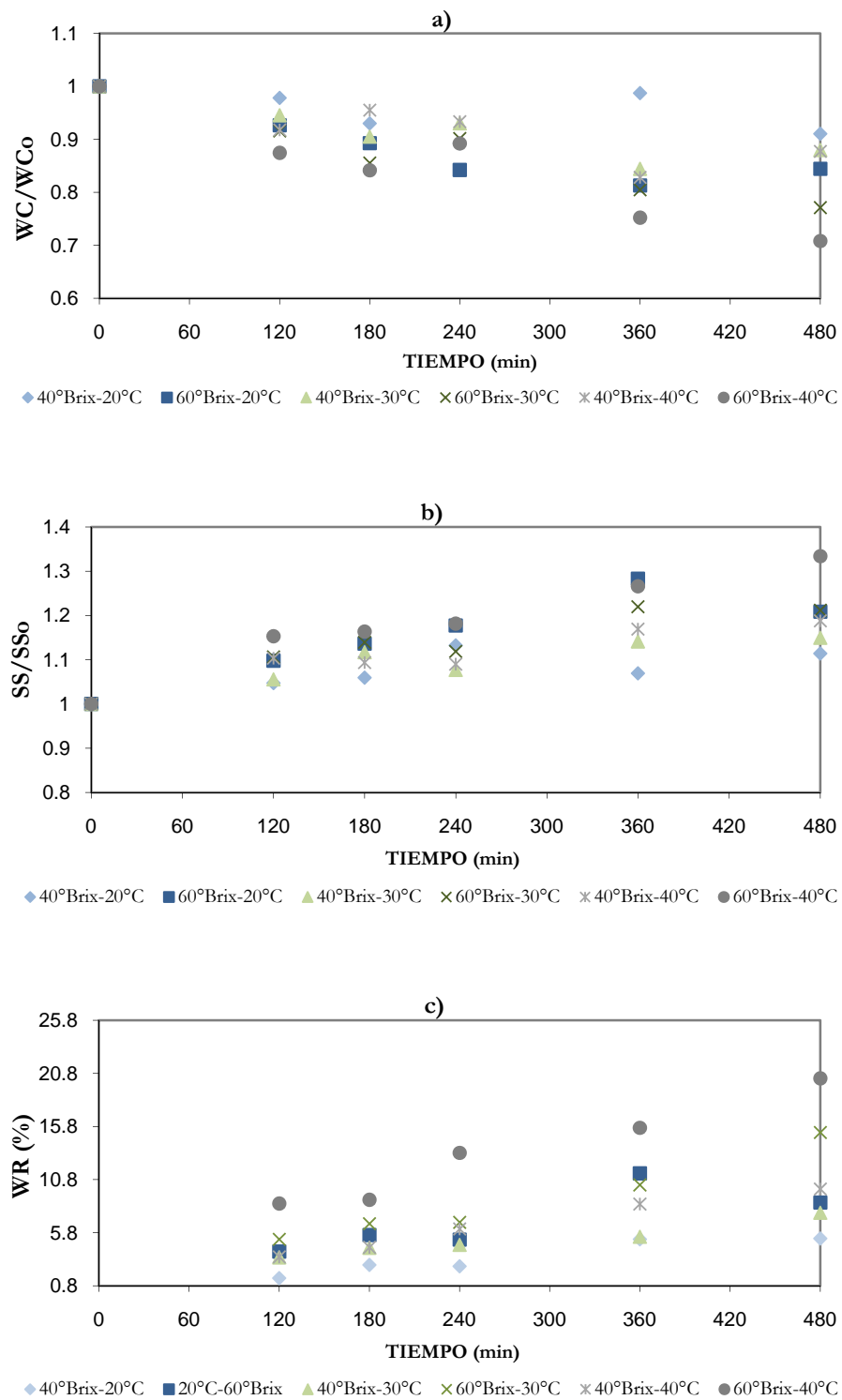
**Figura 18-** Comparación de la composición de las muestras tratadas con EO-NaOH y sin tratar luego de la deshidratación osmótica de arándanos.

### 2.2.7. Deshidratación Osmótica

Durante el procesamiento de arándanos, diferentes niveles en la reducción del WC y aumento de SS se generaron dependiendo de las condiciones de DO aplicadas. Este comportamiento se atribuyó a la acción acoplada de los diferentes mecanismos de transporte de masa (osmo-difusional e hidrodinámico) en distintos grados. El rango de WC alcanzado fue de 77%-82.3% (bh) y el de los SS fue de 15-18°Brix.

El ANOVA determinó que las variables temperatura, concentración de la solución y tiempo de proceso, tuvieron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) sobre los frutos. Tal como se muestra en las Figuras 19a-b, la difusión del agua y sólidos es mayor con el incremento de estas variables. Sin embargo, sus interacciones no fueron significativas ( $p > 0.05$ ), es decir, la variación de una de las condiciones no influyó sobre el efecto de la otra; lo que hizo que WC y SS no tuvieran modificaciones importantes al final de cada tratamiento. En nuestro trabajo, si bien el pretratamiento fue significativo con respecto a la disminución del WC y aumento de SS, la DO generó pequeños cambios luego de las 8 horas de tratamiento. Sinelli y col., (2011) y Giovanelli y col. (2012), confirmaron que el tratamiento por escaldado incrementó la permeabilidad de la piel de los arándanos, probablemente por disolución de la capa de cera hidrofóbica y por ruptura de la pared y membrana celular. A su vez reportaron, en la deshidratación osmótica, pequeños cambios alcanzados a las 6 h de tratamiento y obtuvieron una ganancia de sólidos y pérdida de agua significativas luego de las 24h.

Por otra parte, El-Aouar y col. (2006) observaron la incorporación de pequeñas cantidades de azúcar durante la deshidratación osmótica de papaya, como consecuencia de un alto flujo de agua hacia el exterior del mismo y esto ocurría a altas temperaturas, concentración de azúcar y con agitación. Otros autores también reportaron la aceleración de la pérdida de agua sin modificación en la ganancia de sólidos. (Hawkes y Flink, 1978; Islam y Flink, 1982). En este trabajo, las curvas experimentales presentadas en valores relativos (Figuras 19a-b), mostraron una mayor difusión de los sólidos solubles con respecto a la disminución del WC. No obstante, en los valores reales se observó una mayor pérdida de agua en comparación al aumento de los sólidos solubles.



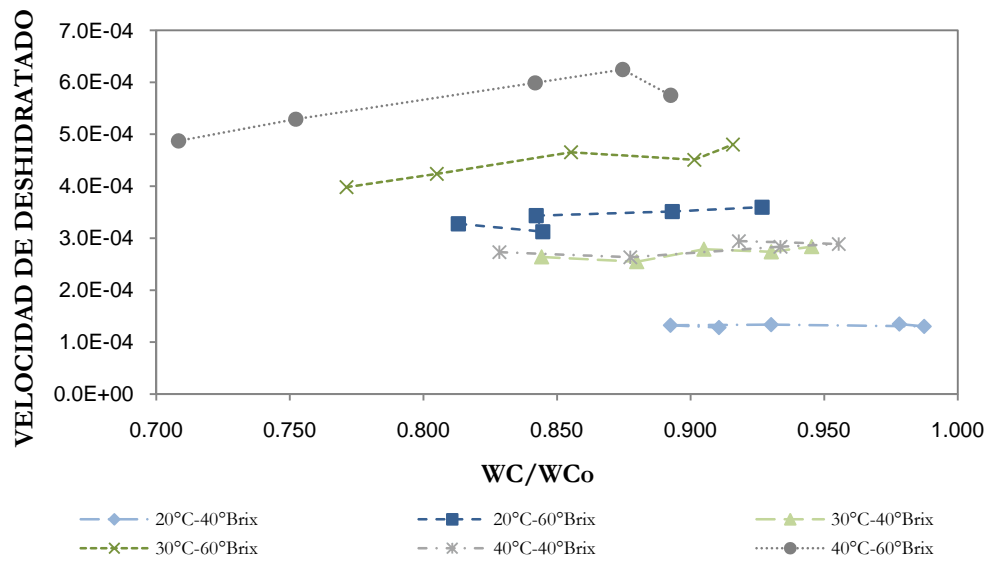
**Figura 19-** Cinéticas de la deshidratación osmótica de arándanos en término de a) disminución del WC, b) aumento de los SS y c) aumento de la WR.

A su vez, la baja velocidad de difusión en la disminución del WC, que se fue desarrollando a lo largo del tiempo, permitió que los solutos presentes en la solución se fuesen depositando sobre la superficie del fruto, imposibilitando el proceso de difusión hacia el interior o exterior del mismo.

La WR (Figura 19c), como ya mencionamos en la sección 2.2.2., es una variable que surge como consecuencia de la remoción del agua y ganancia de sólidos solubles. Al final de cada tratamiento se observaron trozos de frutos y semillas sobrenadando sobre la solución lo cual aporta en los valores de pérdida de peso. El análisis estadístico indicó que al aumentar la magnitud de las variables de proceso existió un efecto considerable sobre la WR. A su vez el tratamiento químico con EO aplicado generó en algunos frutos, dependiendo del grado de madurez que se encontraba, la ruptura de la cáscara lo que llevó a la pérdida de semillas e integridad de las frutas. Por lo tanto, sería razonable suponer que a tiempos  $\geq 6$  h de tratamiento ocurran alteraciones en la estructura del fruto. Una de las razones que podríamos suponer es el alto peso molecular de la sacarosa, el cual impone una fuerza sobre la membrana celular provocando la desintegración de la estructura de la misma. Por otra parte el tratamiento químico si bien es efectivo para permitir aumentar la velocidad de difusión de los flujos participantes durante la DO, también implica un efecto deteriorativo sobre la integridad de los frutos.

La Figura 20 muestra las curvas de velocidad de deshidratación osmótica bajo las diferentes condiciones operativas. Todas las cinéticas presentaron velocidad decreciente y a medida que las condiciones de procesos eran más severas, la disminución fue más pronunciada como se observó en la deshidratación osmótica de frambuesas (Figura 13).

Por otro lado, el incremento de la intensidad de las condiciones provocó una mayor velocidad en el deshidratado de los frutos corroborando lo anteriormente mencionado sobre la Figura 19a. En la sección 2.2.2 de este capítulo, se discutió que este comportamiento se atribuye a la disminución de la viscosidad de las soluciones a medida que la temperatura aumentaba, lo cual provocaba un mayor efecto sobre los frutos inmersos.



**Figura 20-** Curvas de velocidad durante la deshidratación osmótica de arándanos bajo las diferentes condiciones estudiadas.



### 2.2.8. Evaluación de las propiedades ópticas

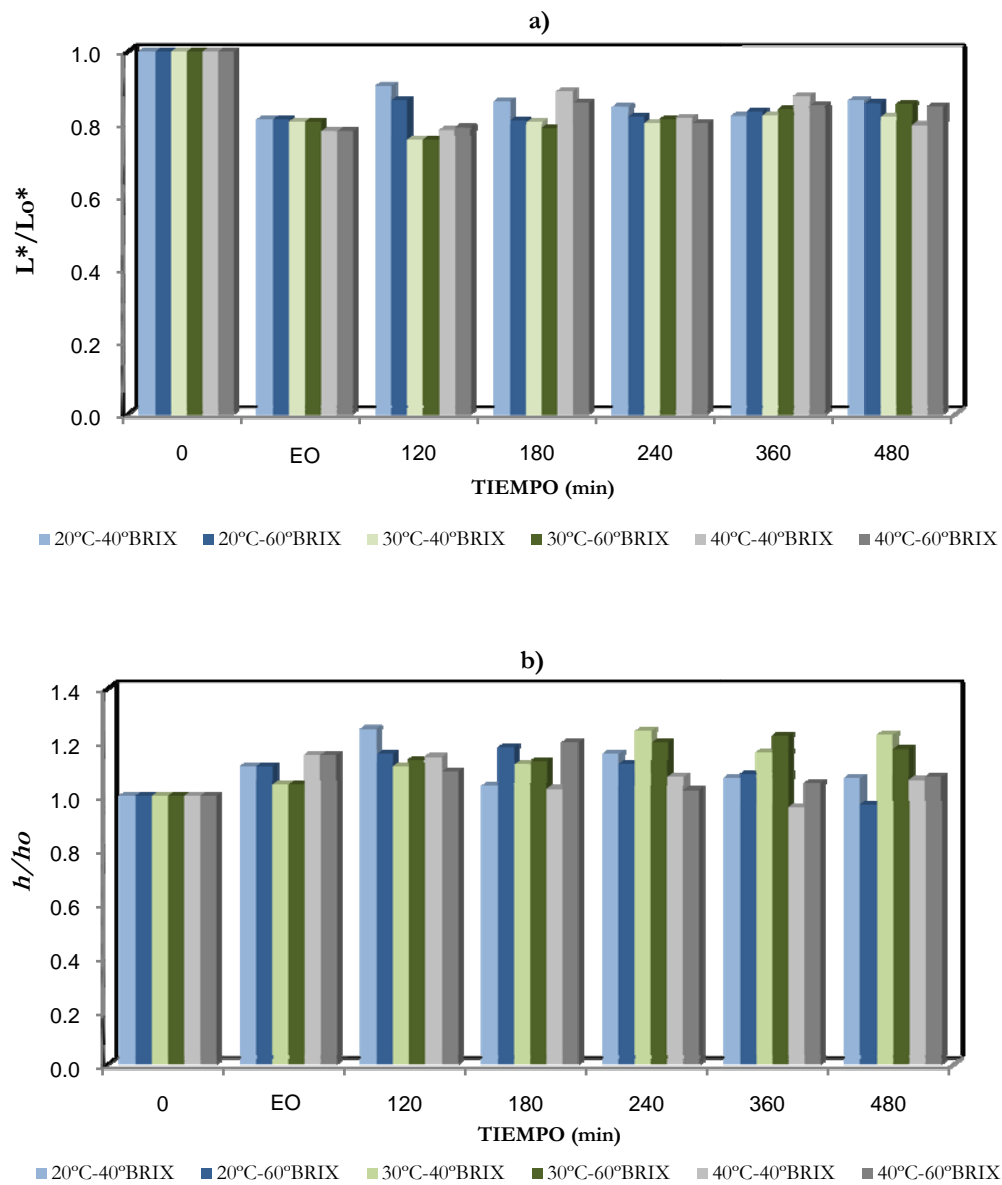
El tratamiento con oleato de etilo (EO) en solución acuosa de NaOH, afectó de manera significativa ( $p < 0.05$ ) los parámetros de color analizados en este trabajo. Esto es coincidente con Doymaz y Pala (2002a) al tratar pimientos rojos con oleato de etilo en condiciones similares. Posterior al tratamiento químico la luminosidad ( $L^*/Lo^*$ ) presentó una disminución, indicando un oscurecimiento en el fruto y el ángulo  $bue$  tuvo un ligero aumento ( $b/bo$ ), como puede observarse en las Figuras 21a-b. El aumento del  $b/bo$  representó un corrimiento desde el tono violáceo hacia un tono rojizo en el esquema de CIELAB presentado en la sección 2, es decir, un enrojecimiento de los frutos.

En las Figuras 21a-b se muestran la evolución de los parámetros de color en función del tiempo obtenidos durante la deshidratación osmótica. La Figura 21a, representa el comportamiento de la luminosidad y se observa para la temperatura más baja (20°C) un leve incremento en las primeras 2 horas de tratamiento y, luego, es posible asumir una leve tendencia decreciente con el avance del tratamiento. Al emplearse las temperaturas de 30°C y 40°C, la luminosidad mostró un incremento a partir de las 3 horas pero se mantuvo constante a medida que el tiempo de DO avanzaba.

Por otra parte, en la Figura 21b se manifiestan los efectos de las variables de proceso sobre el parámetro  $b/bo$ , donde no se observa una clara tendencia de los valores con relación a las variables aunque se puede distinguir un leve incremento del tono  $bue$  a través del tiempo.

El análisis estadístico determinó que solo el tiempo fue la variable significativa en el proceso de DO. Sin embargo, cuando se analizaron las medias se encontraron diferencias significativas con respecto al fresco. Esto expone que el pretratamiento químico influye sobre los parámetros de color y la DO permite mantener valores similares como consecuencia del bajo efecto de los parámetros de proceso sobre el color del fruto.

Asimismo, es posible deducir que los cambios de los parámetros de color son atribuidos a la pérdida de antocianinas. El pretratamiento químico fue realizado a una temperatura mayor que las utilizadas en la DO, lo cual pudo provocar una degradación de la membrana celular facilitando la eliminación de los pigmentos en la superficie de los frutos.



**Figura 21-** Cinéticas de los parámetros de color analizados durante las DO de arándanos a)  $L^*/L_o^*$  y b)  $h/h_o$ .

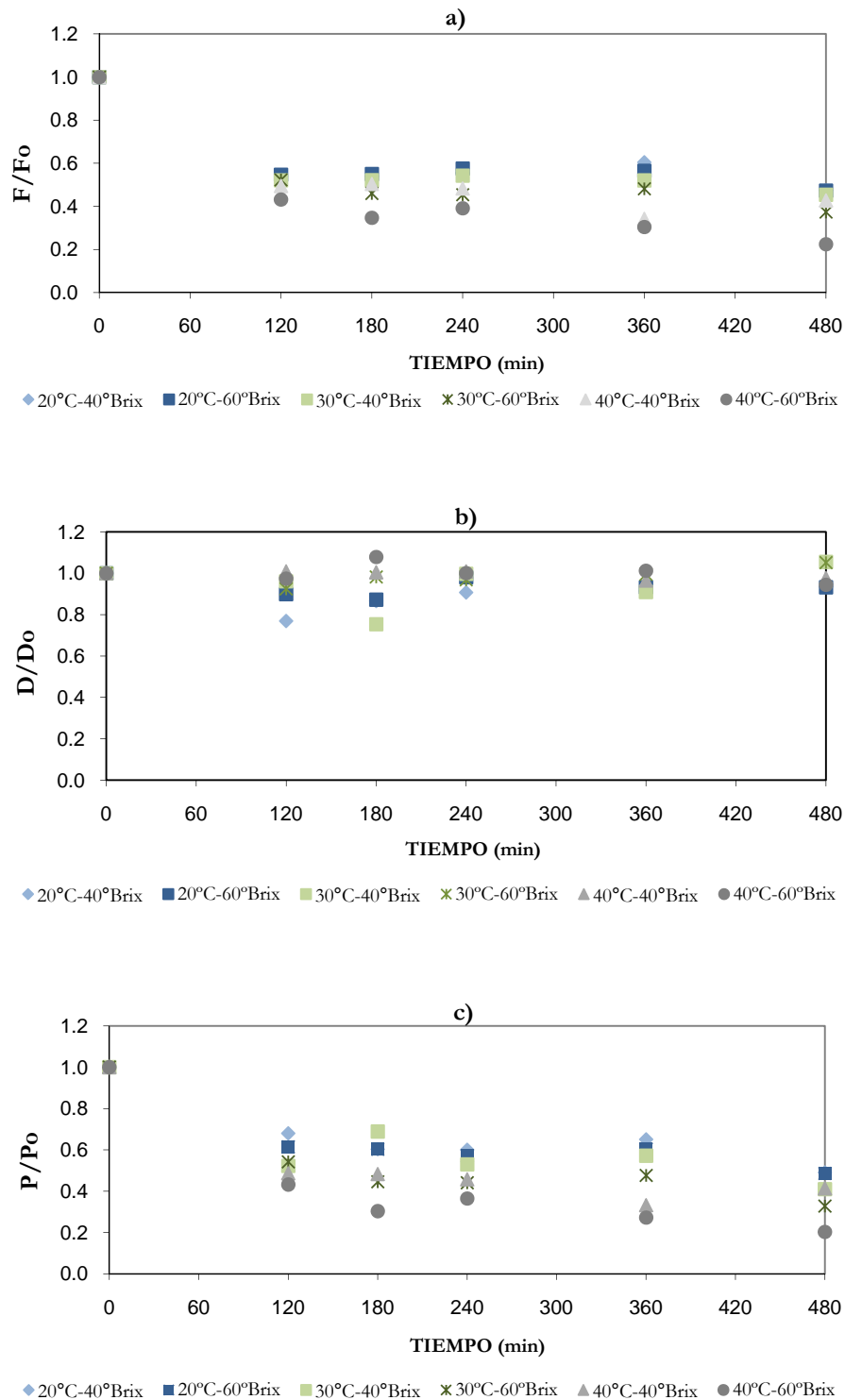
### 2.2.9. Evaluación de las propiedades mecánicas

Las Figuras 22a-b-c muestran la evolución de las propiedades mecánicas analizadas en términos de firmeza, resistencia a la ruptura (deformación) y rigidez (pendiente) en función del tiempo. En todos los casos, las muestras respondieron al tratamiento con una pérdida considerable de la firmeza (Figura 22a) y se tornaron menos rígidas (Figura 22c) frente a la fuerza aplicada. El efecto del proceso sobre las propiedades medidas se registró desde las primeras horas de DO y fue posible asumir una tendencia constante con el avance de los tratamientos.

Analizando la relación entre la pérdida de firmeza de los frutos y la magnitud de la disminución del WC y aumento de los SS, no se observó una dependencia directa. El ablandamiento presentado se atribuyó al efecto generado por parte de la temperatura y concentración de la solución seguida por el tiempo de proceso. Al incrementar la temperatura de 20°C a 40°C, las muestras sufrieron mayores daños en su estructura acentuándose cuando la concentración de la solución era mayor.

La pérdida de estas propiedades es el resultado de la reducción de la integridad de la pared celular. Al aumentar la temperatura, hace que la solución más concentrada reduzca su viscosidad, lo que lleva a una mayor presión osmótica sobre el fruto. Esta fuerza inducida por la solución para tratar de incorporarse en el interior del fruto genera un daño mayor al tejido, resultando en un producto más blando

Simultáneamente, en la Figura 22b, se puede ver el comportamiento de las muestras frente a la deformación. Los resultados indicaron que la deformación de los frutos tratados fue similar a la de la matriz correspondiente a los frutos frescos (sin tratar). Krokida y col. (2000), revelaron que la deformación en ensayos de compresión para diferentes productos agrícolas se mantenía constante cuando los mismos presentaban altos contenidos de humedad durante el secado. Esto es coincidente con lo observado en este trabajo, los frutos obtenidos luego de la DO no perdieron casi nada de agua, por lo tanto, los frutos mantenían alto WC lo que llevó a que las muestras tratadas tengan un grado de deformación similar a las frescas.

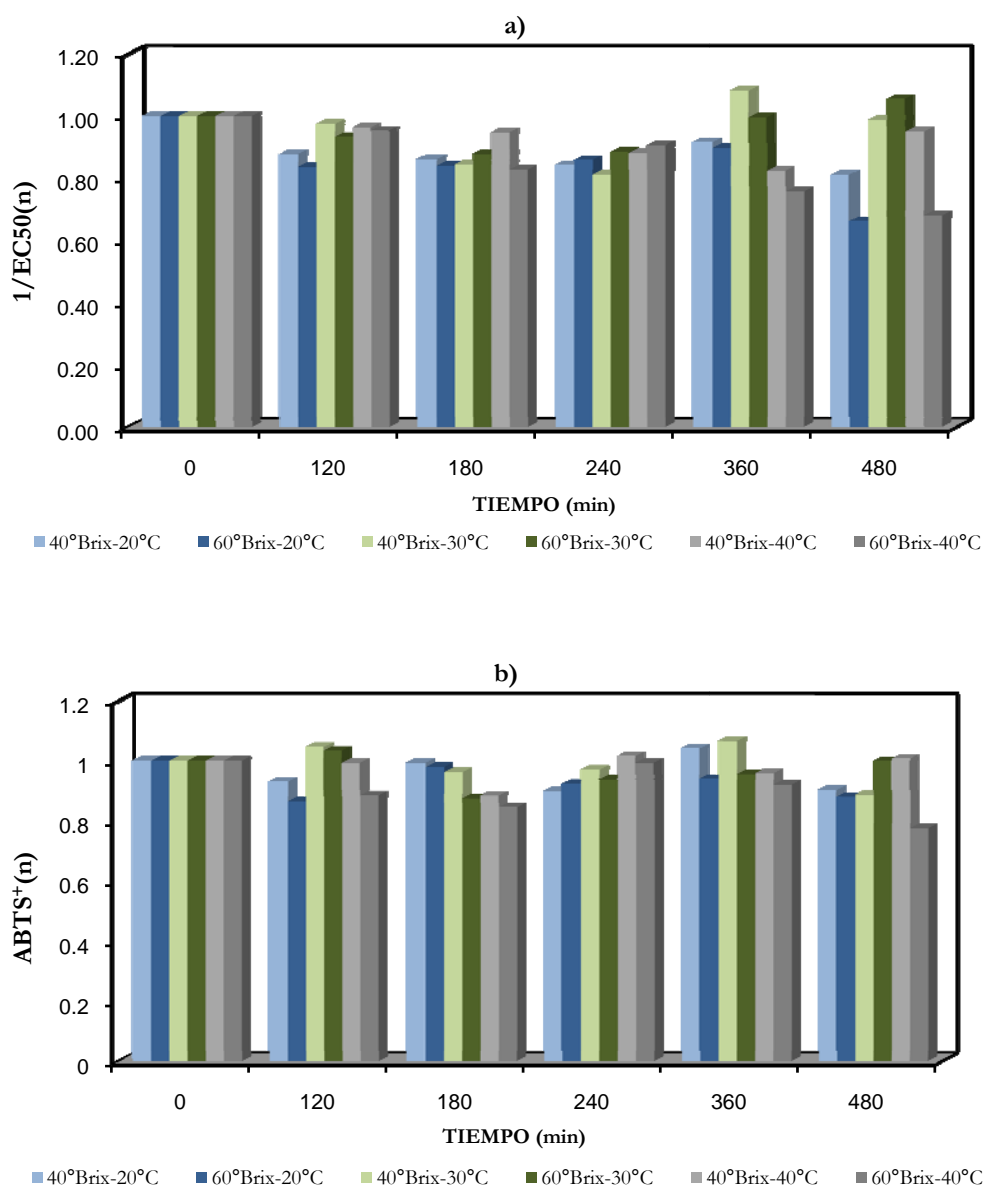


**Figura 22-** Cinéticas de las propiedades mecánicas analizadas durante las DO de arándanos  
a) F/F<sub>0</sub>: Firmeza, b) D/D<sub>0</sub>: Deformación y c) P/P<sub>0</sub>: Rigidez.

El análisis estadístico determinó que todas las variables analizadas provocaron un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre la firmeza y rigidez de las muestras. En tanto, en la deformación la temperatura y el tiempo fueron variables significativas. Al analizarse las medias, se demostró que la firmeza tuvo un cambio drástico en las primeras dos horas de DO, manteniéndose constante a lo largo del tiempo. El mismo comportamiento fue observado en la rigidez. Sin embargo, el cambio de este parámetro fue más significativo a partir de las tres horas con respecto al tiempo final. Además, en las Figuras 22 a-c podemos ver que las muestras tratadas con las condiciones más severas (40°C y 60°Brix) presentaron un mayor daño en su estructura exhibiendo una mayor pérdida de las propiedades mecánicas.

## 2.2.10. Evaluación de la capacidad antioxidante

La influencia de las variables de proceso sobre la CA de los frutos puede observarse en las Figuras 23a-b donde se representan  $1/EC50(n)$  vs tiempo (Figura 23a) y  $ABTS^+(n)$  vs tiempo (Figura 23b), respectivamente. Puede apreciarse que para los arándanos, no se observó un efecto claro de las condiciones de proceso sobre la CA.



**Figura 23-** Cinéticas de la capacidad antioxidante durante las DO de arándanos analizados por a)  $1/EC50(n)$  y b)  $ABTS^+(n)$ .

Mediante el empleo de la metodología del radical DPPH y ABTS<sup>+</sup>, la falta de claridad en las tendencias es atribuida a la complejidad y heterogeneidad de la naturaleza de las muestras así como a la dificultad práctica de asegurar la uniformidad de las condiciones de trabajo. También se puede inferir que la DO tuvo un efecto mínimo sobre la CA.

Por otra parte es posible distinguir, en forma general, una leve disminución de la CA a partir de las primeras horas de tratamiento manteniéndose luego constante hasta finalizar el proceso. La razón que se atribuye a este comportamiento, es el tratamiento químico aplicado con el fin de eliminar la cera de la cáscara. La gran mayoría de los compuestos antioxidantes se encuentran en la piel de los frutos, por lo tanto si bien los tiempos de trabajo fueron cortos, la temperatura (60°C) utilizada pudo generar una degradación térmica de los compuestos antioxidantes. Giovanelli y col. (2012) observaron que el pretratamiento de escaldado (85°C) utilizado para mejorar la permeabilidad de la piel de los arándanos, originó una pequeña disminución de la concentración de fenoles totales. El análisis estadístico indicó que las variables estudiadas en la DO no tuvieron influencia significativa ( $p>0.05$ ) sobre la CA.

### 2.3. CONCLUSIONES

#### FRAMBUESAS

- Durante la deshidratación osmótica, la velocidad de deshidratación fue disminuyendo gradualmente durante todo el tiempo de proceso pero fue creciente cuando la temperatura y concentración de la solución fueron mayores. En tanto, la remoción del agua en el interior del fruto como la incorporación de los sólidos solubles presentaron similares comportamientos, modificándose a medida que los tratamientos osmóticos avanzaban. En lo que respecta a la pérdida de peso, el mayor aumento de este parámetro no solo se generó por los flujos de agua y sólidos sino también por la desintegración de algunos frutos, observándose semillas sobrenadando sobre la solución. La temperatura y concentración de la solución fueron factores influyentes sobre estos parámetros.
- Con respecto al color, se pudo ver una modificación de este parámetro desde el inicio del tratamiento. La luminosidad presentó una pequeña disminución de las muestras como consecuencia de la presencia de solución en la superficie del fruto, lo cual le aporta el color caramelo de la misma. Por otra parte, el ángulo *hue* aumentó a medida que el tiempo de proceso y temperatura de la solución fueron mayores. Esto indicó una gran pérdida de los pigmentos naturales de los frutos, resultado que pudo evidenciarse al final de cada tratamiento cuando se observó la coloración rojiza de las soluciones de sacarosa.
- Las propiedades mecánicas analizadas durante este trabajo también fueron afectadas por las condiciones de proceso testeadas. Las frambuesas presentaron una disminución progresiva de la firmeza hasta las 2 primeras horas y luego de esto se mantuvo prácticamente constante hasta el final. Un comportamiento similar fue observado en la deformación. Hay que tener en cuenta que los frutos al final de cada tratamiento aún tenían un alto contenido de agua, lo que llevó a que las muestras fueran menos deformables y firmes. Sin embargo la firmeza presentada fue menor que la del fresco, con lo que se concluye la presencia de cierto daño en la pared celular o modificaciones de la membrana celular de los frutos como consecuencia del



proceso de la deshidratación osmótica. Con respecto a la rigidez, no se observó una clara tendencia de los efectos de las condiciones de trabajo sobre esta propiedad.

- Por otro lado, la capacidad antioxidante de las frambuesas fue afectada por las condiciones de la deshidratación osmótica. A medida que las condiciones de proceso fueron más severas, la pérdida de la capacidad antioxidante es más acentuada. Al comparar la disminución del contenido de agua con el comportamiento de la capacidad antioxidante, se observó una clara dependencia de la retención de la capacidad antioxidante con el contenido de agua presente en los frutos. Una mayor disminución del contenido de agua implicó una gran pérdida de antocianinas (pigmentos rojos naturales del fruto) durante los tratamientos de deshidratación osmótica.
- El análisis final de todos los parámetros evaluados, determinó que las condiciones ideales para la aplicación de la deshidratación osmótica como tratamiento previo al secado con microondas es a una temperatura de 20°C con una concentración de solución de sacarosa del 60°Brix durante 360 min, las cuales permitieron una mínima pérdida del valor nutricional y de las propiedades ópticas y estructurales de los frutos.

#### ARÁNDANOS

- En arándanos, todas las variables de proceso presentaron influencia sobre la disminución del contenido de agua y aumento de sólidos solubles. Sin embargo, las interacciones entre estas no influyeron significativamente sobre los productos. En cuanto a la pérdida de peso, luego de finalizados los tratamientos, se pudo observar que los valores de este parámetro también fueron influenciados por los trozos de fruta y semillas presentes en las soluciones. La velocidad de deshidratado presentó un comportamiento similar al observado en frambuesas.
- Con respecto al color, los arándanos fueron afectados por el pretratamiento químico aplicado para la eliminación de la cera de la piel, obteniendo un fruto más oscuro y enrojecido. Cuando estos frutos fueron sometidos a las diferentes condiciones de trabajo, se observó un incremento de la luminosidad y del ángulo *hue*. Sin embargo el análisis de las medias determinó que solo el pretratamiento químico influyó sobre el

color sin observarse modificaciones durante la deshidratación osmótica. Solo la temperatura fue influyente sobre la luminosidad.

- Las respuestas mecánicas evaluadas en arándanos determinaron que los frutos presentaron un mayor ablandamiento y menor resistencia a la ruptura que los frutos frescos. A su vez, presentaron igual deformación que los frutos sin tratar debido al alto contenido de agua presente en los mismos. El parámetro tiempo no tuvo influencia durante el transcurso del deshidratado osmótico. Solo se encontraron diferencias significativas con respecto al fresco. Esto significó que los cambios ocurridos durante la deshidratación osmótica fueron en las primeras dos horas, manteniéndose constante hasta el final del proceso. A su vez, en este caso, deshidratar a 60°Brix y 40°C tuvo un mayor efecto sobre la firmeza y resistencia a la ruptura.
- Los valores obtenidos en la evaluación de la capacidad antioxidante de los arándanos, fueron muy dispersos debido al mínimo efecto generado por la deshidratación osmótica. Si bien no se observó una tendencia clara de las distintas condiciones de proceso, pudo apreciarse que existió una pequeña disminución que se atribuyó al pretratamiento químico aplicado sobre la piel, donde pudo generarse una degradación térmica de los compuestos antioxidantes presentes en ella.
- El análisis final de los parámetros determinó que la deshidratación osmótica en los frutos no generó cambios altamente significativos, por lo tanto, la condiciones que se aplicarán como pretratamiento son a temperatura de 40°C con una concentración de sacarosa de 60°Brix durante 360min.

### *3. SECADO POR AIRE CALIENTE*

### 3. SECADO POR AIRE CALIENTE

El secado convectivo es una de las operaciones más utilizadas en el deshidratado de alimentos. Durante su aplicación la eliminación del agua ocurre mediante dos vías: la migración del agua en el interior del material a secar y luego la vaporización de la humedad en la superficie del alimento. Este mecanismo es el más utilizado para explicar la cinética de secado de los frutos. Las transferencias de masa y calor ocurren de manera simultánea y son afectadas por varias condiciones internas y externas, tal como las propiedades del material a trabajar, las condiciones del aire (temperatura, humedad y velocidad) y el tiempo de proceso.

Generalmente, el secado de alimentos es caracterizado por dos etapas sucesivas: el período de velocidad constante y el de caída de velocidad de secado. En un alimento con alto contenido de humedad, la superficie se encuentra saturada con agua. La velocidad de eliminación del agua es constante durante un período inicial de tiempo hasta que la migración de la humedad hacia la superficie no es suficiente para mantenerla en un estado saturado y por tanto el período de velocidad constante finaliza. En este punto, el contenido de humedad se conoce como contenido de humedad crítico. A partir de ese momento, el período de caída de velocidad de secado comienza y la misma cae hasta el final del proceso. Las frutas con alto contenido de agua libre, tal como los arándanos y frambuesas, usualmente presentan un período de velocidad constante durante el secado si la temperatura no es demasiado alta.

La velocidad de secado durante el segundo período es controlada por el gradiente de concentración de humedad dentro de la matriz del alimento. El movimiento interno de la humedad es el resultado de numerosos mecanismos tales como la difusión del líquido, flujo capilar, flujos debido a la contracción y gradientes de presión (Nguyen y Price, 2007).

Las ventajas de la deshidratación de frutos son bien conocidas, como la reducción de la humedad del producto que permite retardar en gran medida el crecimiento microbiano y deterioro químico y produce una reducción sustancial del volumen (Doymaz y Pala, 2003). Sin embargo los productos alimenticios son sensibles a las condiciones de secado (temperatura, velocidad de aire y humedad relativa), las cuales pueden causar un deterioro de la calidad del producto a través de reacciones de oxidación, cambios de color,

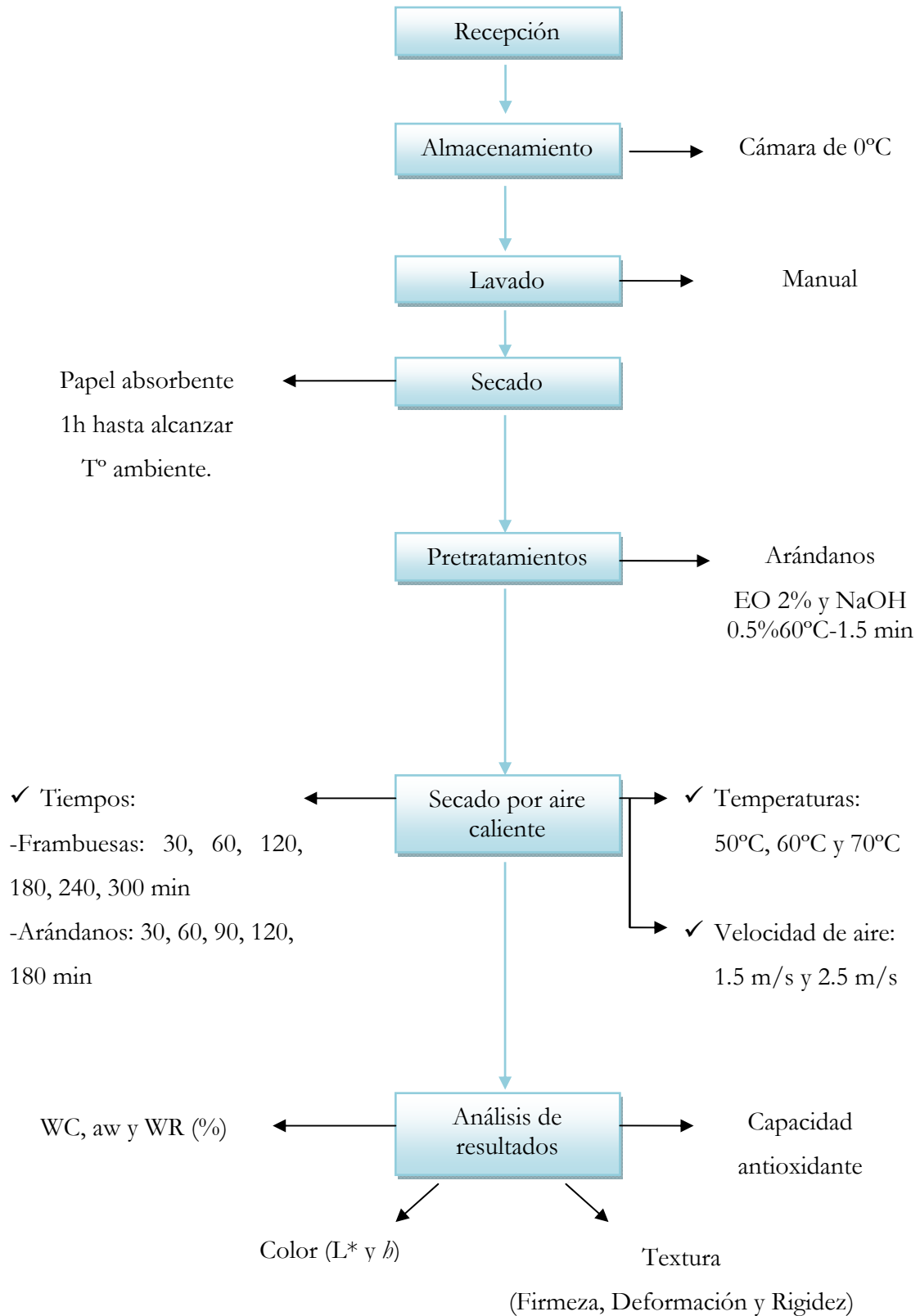
encogimiento o pérdida de textura y en las propiedades funcionales y nutricionales (Vega-Galvez y col., 2009). Para reducir estos problemas, existen procesos de secado más rápidos y efectivos como la aplicación de microondas en procesos combinados. La combinación del secado con microondas y aire caliente crea un efecto sinérgico en términos de uniformidad en el calentamiento y trae ventajas significativas con respecto al tiempo de procesamiento y calidad (Drouzas y Schubert, 1996; Funebo y Ohlsson, 1998; Berteli y Marsaioli, 2005).

Por otra parte, la calidad de los productos secos es relevante para la selección de un método adecuado de deshidratación de los alimentos. La evaluación de las propiedades organolépticas tales como el color, textura y el valor nutricional (capacidad antioxidante) de los frutos es fundamental para la elección de las condiciones óptimas de secado y aceptabilidad del producto. El efecto de las condiciones y métodos de secado en la calidad del producto intermedio o final han sido reportados por varios autores (Krokida y col., 1998; Krokida y Maroulis, 1999).

El objetivo de este capítulo fue estudiar la transferencia de masa durante el secado por aire caliente de frambuesas y arándanos bajo diferentes combinaciones de variables de proceso (velocidad y temperatura de aire y tiempo), analizando la influencia de las mismas sobre los aspectos fisicoquímicos y de calidad del producto intermedio obtenido. Para evaluar la transferencia de masa, la misma se realizó a través del comportamiento de la reducción del contenido de agua (WC), pérdida de peso (WR) y actividad acuosa ( $a_w$ ) en función del tiempo. A su vez la calidad del producto se determinó de igual forma como en el capítulo anterior.

### 3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1.1. Diseño experimental



### 3.1.2. Secado por aire caliente (SAC)

La preparación de las muestras fue descrita en la sección 2.1.2. Por otra parte, el diseño experimental utilizado para el pretratamiento de secado con aire caliente (SAC) consistió en 2 niveles de velocidad de aire (1.5 y 2.5 m/s), 3 niveles de temperatura de aire (50°C, 60°C y 70°C) y 5 tiempos de contacto en arándanos (30, 60, 90, 120 y 180 min) y 6 tiempos para frambuesas (30, 60, 120, 180, 240 y 300 min). Por otra parte, los arándanos fueron sometidos al tratamiento químico de EO descrito en el capítulo anterior.

El proceso de aire caliente se llevó a cabo en un secador horizontal (Industria Argentina) con paredes aisladas provisto de bandejas de acero inoxidable. Contiene un marco con capacidad para tres bandejas de 0.20 x 0.20 m de lado. El equipo permite controlar la temperatura y velocidad, lo que evita perturbar el fenómeno en estudio y puede secar más de una muestra en un solo ensayo. Funciona impulsando aire ambiente con una velocidad definida por el regulador de velocidad hacia las resistencias eléctricas calentando el aire hasta la temperatura deseada, esta temperatura se regula mediante un medidor conectado a un sistema de control que permite que durante el tiempo de operación esta se mantenga estable (Figura 24). En la Tabla 5 se describen las partes constituyentes del equipo.

Al final de cada secado, se registraron los pesos de los frutos procesados y se tomaron distintas fracciones de las muestras para el análisis de los parámetros de calidad.



**Figura 24-** Túnel de secado.

**Tabla 5-** Partes constituyentes del Túnel de secado.

<b>Código</b>	<b>Parte</b>
<b>a</b>	Conducto paralelo de derivación
<b>b</b>	Resistencias internas de calentamiento de aire
<b>c</b>	Deflector de derivación
<b>d</b>	Control automático de temperatura del aire
<b>e</b>	Controlador de velocidad de aire
<b>f</b>	Balanza digital de precisión
<b>g</b>	Cámara de secado aislada térmicamente
<b>h</b>	Sensores de temperatura del aire
<b>i</b>	Orificio para tomar medidas de temperatura sin contacto

### 3.1.3. Análisis de los parámetros de calidad

Se determinaron la pérdida de peso (WR), el contenido de agua (WC), las propiedades ópticas, propiedades mecánicas y la capacidad antioxidante mediante las técnicas descriptas en el capítulo 2. La WR y el WC fueron calculados por las ecuaciones (1) y (2) y el WC fue normalizado mediante la ecuación (3) de la sección 2.1.4.

A su vez, se determinó la actividad acuosa ( $a_w$ ) mediante un psicrómetro (Acqualab 3.0 Decagon devices Inc. Pullman, WA-USA), calibrado con solución saturada de CLNa ( $a_w$ : 0.753) a temperatura 25°C. Todas las mediciones fueron realizadas por triplicado. La  $a_w$  fue normalizada mediante la ecuación (11):

$$\text{Actividad acuosa} = \frac{a_w}{a_{w_0}} \quad (11)$$

Donde la  $a_w$  es la actividad acuosa en un determinado tiempo de proceso y  $a_{w_0}$  es la actividad de agua del producto fresco.



## 3.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### FRAMBUESAS

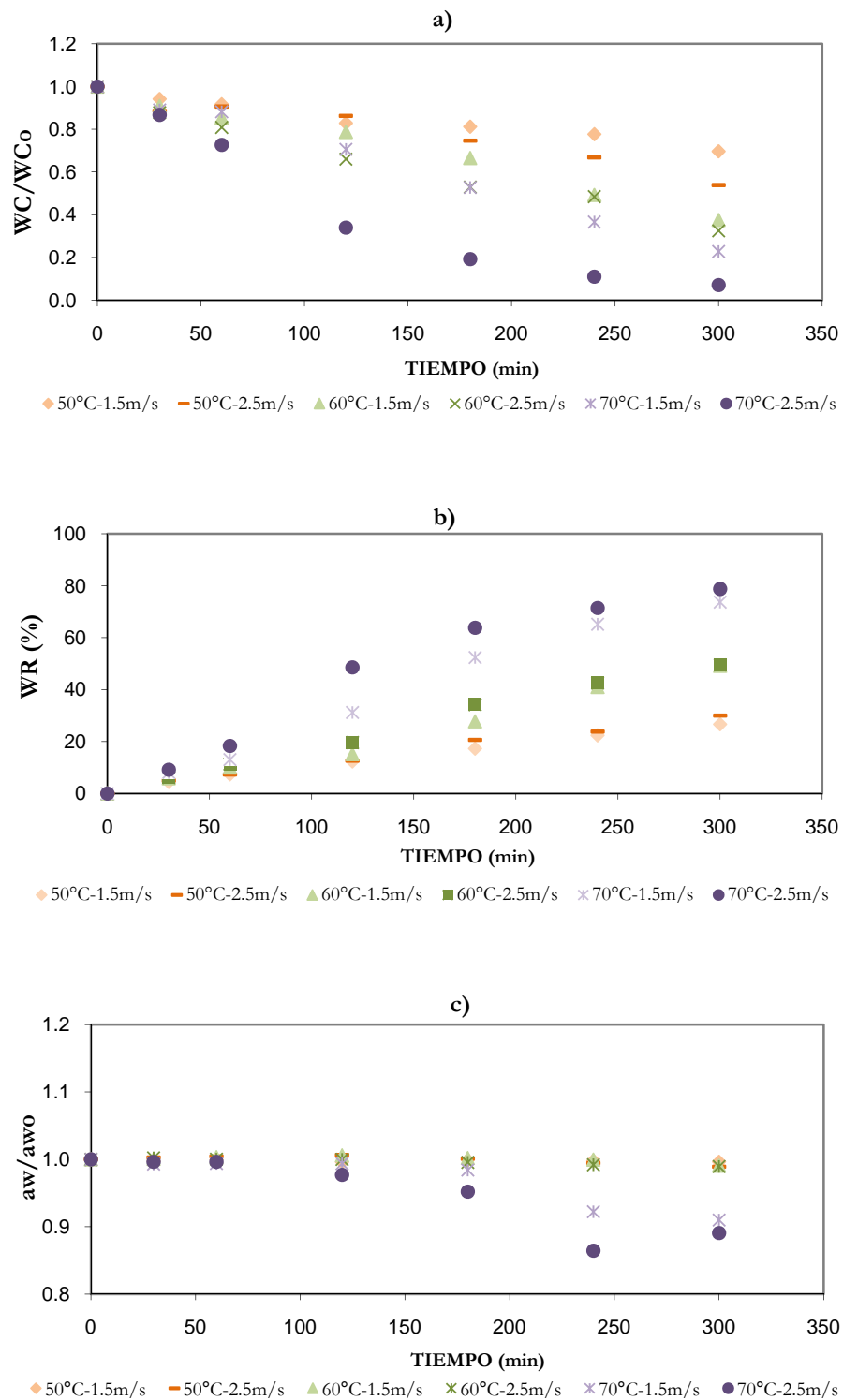
#### 3.2.1. Secado por aire caliente

Las cinéticas de secado en términos de la disminución del contenido de agua (WC), pérdida de peso (WR) y actividad acuosa (aw) en función del tiempo se muestran en las Figuras 25a-b-c. Independientemente de las condiciones aplicadas, se observa – como era esperable - que el WC y aw en los frutos va disminuyendo y que la WR se va incrementando a medida que el tiempo de secado aumenta.

Para el rango de condiciones de los experimentos analizados, el factor que más influyó sobre el secado de frambuesas fue la temperatura. Cuando las frambuesas (Figura 25a) fueron sometidas a la mayor temperatura de aire (70°C), el WC final obtenido nunca pudo ser alcanzado durante el secado a 50°C dentro del tiempo estudiado. Así, se comprobó que la temperatura de aire tiene un efecto directo en la disminución del contenido de humedad y tiempo de secado. Acorde con Doymaz (2005), quien trabajó con ají, el efecto de la temperatura de aire fue el más relevante en la disminución del WC, siendo un factor significativo ( $p < 0.05$ ) en el secado de los frutos.

Si observamos la Figura 25a el secado a 50°C presenta una disminución muy lenta del WC y a 60°C y 70°C, la velocidad de secado se acrecienta. Esto es atribuido, de acuerdo con la teoría de la cinética, al aumento de la energía de las moléculas de agua cuando la temperatura del aire es mayor, generando un escape del vapor de agua de manera fácil y rápida hacia el medio.

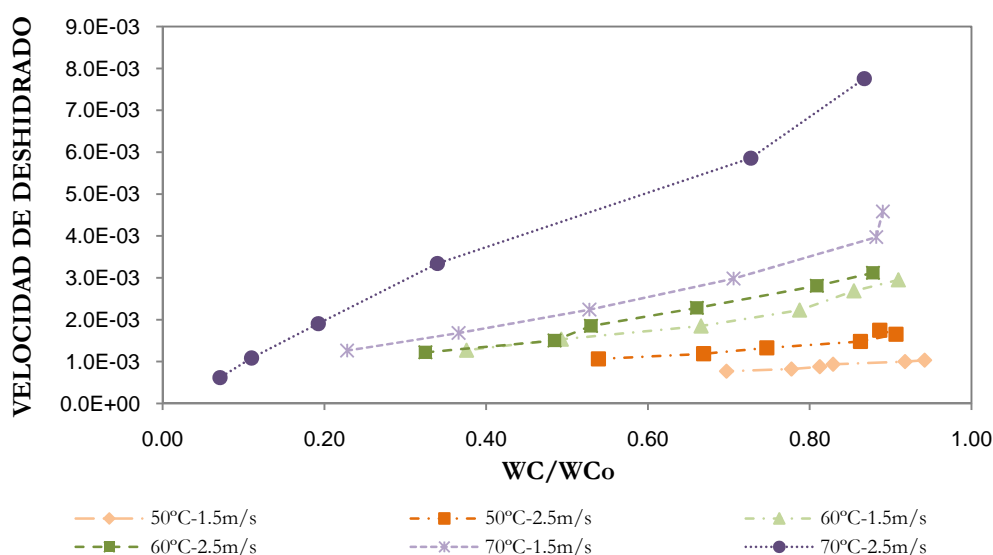
La velocidad de aire fue otra de las variables de análisis y se comprobó que ambas velocidades trabajadas no mostraron tener un efecto importante durante el secado de 50°C y 60°C. En la Figura 25a, se muestra que esta variable influyó en las frambuesas cuando fueron sometidas a una temperatura de aire de 70°C presentando una mayor disminución del contenido de agua cuando se utilizó la velocidad de 2.5m/s. Hay que tener en cuenta que las frambuesas durante el tiempo de secado pudieron haber sufrido considerables daños, modificando su permeabilidad y facilitando la difusión del agua dentro del fruto cuando la fuerza impulsora fue mayor.



**Figura 25-** Cinéticas de secado de frambuesas de a) contenido de agua (WC), b) pérdida de peso (WR) y c) actividad acuosa (aw).

En lo que respecta a la WR y aw (Figuras 25b-c, respectivamente), se ve claramente que presentan una estrecha relación con el WC, al disminuir el contenido de humedad, la WR fue mayor y menor su aw. Estos resultados fueron concordantes con otros autores (Aghbashlo y col., 2009; García Mahecha y col., 2010).

A partir de los datos obtenidos, la velocidad de secado fue calculada para cada combinación de variables de proceso en función del contenido de agua normalizado. En la figura 26 se observa un claro efecto de las condiciones de proceso a medida que su intensidad incrementaba. Corroborando lo observado en la Figura 25a, los procesos a 70°C presentaron las velocidades de secado más elevadas debido a la mayor fuerza impulsora (diferencia de temperatura). La velocidad de aire también tuvo su efecto bajo esta temperatura, incrementando la velocidad de deshidratado cuando esta variable era mayor.



**Figura 26-** Curvas de velocidad de secado bajo las diferentes condiciones estudiadas durante el SAC de frambuesas.

En las curvas se muestra la presencia de un régimen de velocidad decreciente en todo el transcurso de los procesos estudiados. Estos resultados son acordes con Kaymak-Ertekin (2002) para pimientos rojos y verdes, Akpinar y col. (2003) para calabazas y Doymaz (2007a) para rodajas de calabazas. El predominio del período de velocidad decreciente muestra como el proceso es controlado por la difusión de la humedad desde el interior del fruto hacia la superficie, lo que concuerda con otros autores (Gogus y Maskan, 1999; Kaymak-Ertekin, 2002; Akpinar y col., 2003; Sogi y col., 2003; Doymaz, 2007a).

### 3.2.2. Evaluación de las propiedades ópticas

En general el secado por aire caliente modifica el color de los frutos debido, principalmente, a los efectos de la temperatura sobre los compuestos termosensibles tales como los carbohidratos, proteínas y vitaminas, la cual causa una degradación del color en los alimentos frescos (Hawtlader y col., 2006). Similares observaciones fueron reportadas por Prothon y col. (2001) en manzanas, Femenia y col. (2003) en aloe vera y Vega-Galvez y col. (2008) en pimientos rojos.

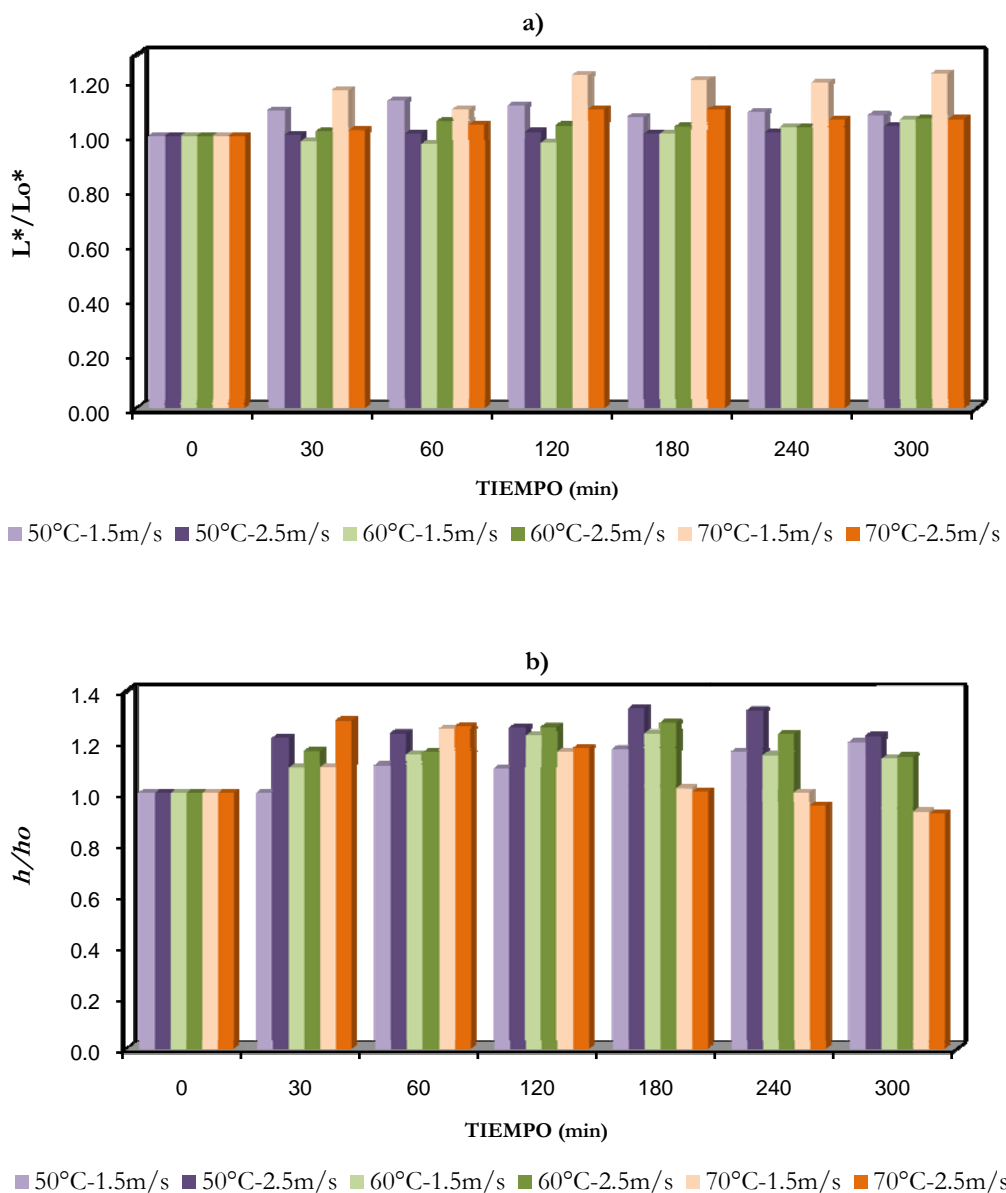
Durante las pruebas realizadas, las frambuesas (Figura 27a) presentaron un leve aumento del valor  $L^*/Lo^*$  a partir de los 30 minutos y se mantuvo constante a lo largo de los tratamientos a 60°C y 50°C. Cuando fueron secadas con la mayor temperatura (70°C), el incremento en  $L^*/Lo^*$  fue más evidente y fue mayor cuando se utilizó la menor velocidad de aire (1.5 m/s). Esto indica que las muestras exhibieron mayor claridad en su color.

En cuanto al parámetro  $b/b_0$  de las frambuesas (Figura 27b), diferencias significativas ( $p<0.05$ ) fueron encontradas para todas las temperaturas de trabajo aplicadas. Cuando las muestras se secaron a 50°C, el  $bue$  incrementó a medida que aumentó el tiempo y fue mayor aún, cuando se utilizó la velocidad de aire 2.5 m/s. Las muestras procesadas a 60°C, presentaron un incremento hasta los 120 minutos manteniéndose constante hasta el final, sin observarse efectos significativos entre las velocidades de aire.

El incremento en este parámetro ( $b/b_0$ ) acompañado con un incremento en el valor  $L^*/Lo^*$  indica que hubo una decoloración de los frutos, presentando un color rosado claro. Este efecto se atribuye a la degradación térmica de las antocianinas por las altas temperaturas utilizadas en el proceso. Forni y col. (1993) reportaron que las antocianinas no son térmicamente estables y su exposición a altas temperaturas favorece su oxidación, resultando en una degradación del color.

Un comportamiento diferente se observó en el secado a 70°C, al inicio las muestras presentaron un incremento del  $b/b_0$ , pero luego este parámetro tuvo una importante disminución hasta el final; sin observarse grandes diferencias entre las velocidades de aire. Esto indicó que el ángulo  $bue$  tuvo un corrimiento hacia un color más rojo. Estos resultados son concordantes con otros autores (Forni y col., 1993; Guiné y Barroca, 2012). El análisis estadístico para el secado de frambuesas determinó que todas las variables de proceso aplicadas tuvieron efectos significativos ( $p<0.05$ ) sobre  $L^*/Lo^*$  y  $b/b_0$ . A su vez la

temperatura fue el factor más importante. En  $L^*$ , la interacción temperatura-velocidad de aire fue significativa y en  $hue$  tanto el tiempo como la velocidad presentaron efectos significativos al interaccionar con la temperatura ( $p < 0.05$ ). El análisis de media determinó que secar a 50°C o 60°C afecta del mismo modo sobre  $L^*/Lo^*$  y  $h/ho$ . En cuanto a la velocidad de aire, si bien se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre ellas, el efecto se observó más cuando las muestras fueron procesadas a 70°C.



**Figura 27** – Evaluación del color durante el SAC de frambuesas bajo las diferentes condiciones de proceso a)  $L^*/Lo^*$  y b)  $h/ho$ .

En cuanto al tiempo, las muestras presentaron una mayor modificación en el parámetro  $b/b_0$  a partir de los 120 minutos (Figuras 27a-b). Por otro lado, el análisis estadístico determinó que la luminosidad solo fue afectada hacia el final del proceso. Es claro que el tiempo de proceso tuvo gran influencia cuando las muestras fueron expuestas frente a la temperatura más alta. Los valores del ángulo  $bue$  disminuyeron a medida que el tiempo de proceso avanzaba, presentando un corrimiento hacia las tonalidades rojizas.

Podemos decir entonces, que la luminosidad constante y la disminución de los valores  $bue$  (tonalidad más rojiza) nos indicó ausencia de pardeamiento, como así también, el cambio de tonalidad se debió a la concentración de pigmentos como consecuencia de la disminución del contenido de agua dentro del fruto (Tabla 6).

**Tabla 6-** Comportamiento de los parámetros de color durante el secado de frambuesas a 70°C.

Tratamientos	Tiempo (min)	WC (%)	L*	b
70°C-1.5m/s	0	86.642±0.505	36.484±2.013	17.428±1.550
70°C-1.5m/s	30	84.754±0.823	42.643±1.709	19.211±2.056
70°C-1.5m/s	60	84.388±0.821	39.955±2.598	21.772±1.256
70°C-1.5m/s	120	79.649±2609	44.543±0.128	20.199±1.250
70°C-1.5m/s	180	70.993±1.421	43.971±1.452	17.719±1.175
70°C-1.5m/s	240	59.853±6.062	43.651±1.736	17.439±1.632
70°C-1.5m/s	300	46.035±9.192	44.747±0.875	16.138±1.708
70°C-2.5m/s	0	84.160±1.306	42.315±2.438	15.532±0.563
70°C-2.5m/s	30	81.896±2.770	43.106±1.674	19.921±1.270
70°C-2.5m/s	60	79.248±2.022	43.995±1.970	19.551±1.469
70°C-2.5m/s	120	63.255±8.172	46.326±1.658	18.267±1.629
70°C-2.5m/s	180	49.821±6.406	46.414±0.836	15.606±0.448
70°C-2.5m/s	240	36.599±4.286	44.720±0.595	14.782±0.528
70°C-2.5m/s	300	26.851±1.158	44.844±0.812	14.289±1.708

### 3.2.3. Evaluación de las propiedades mecánicas

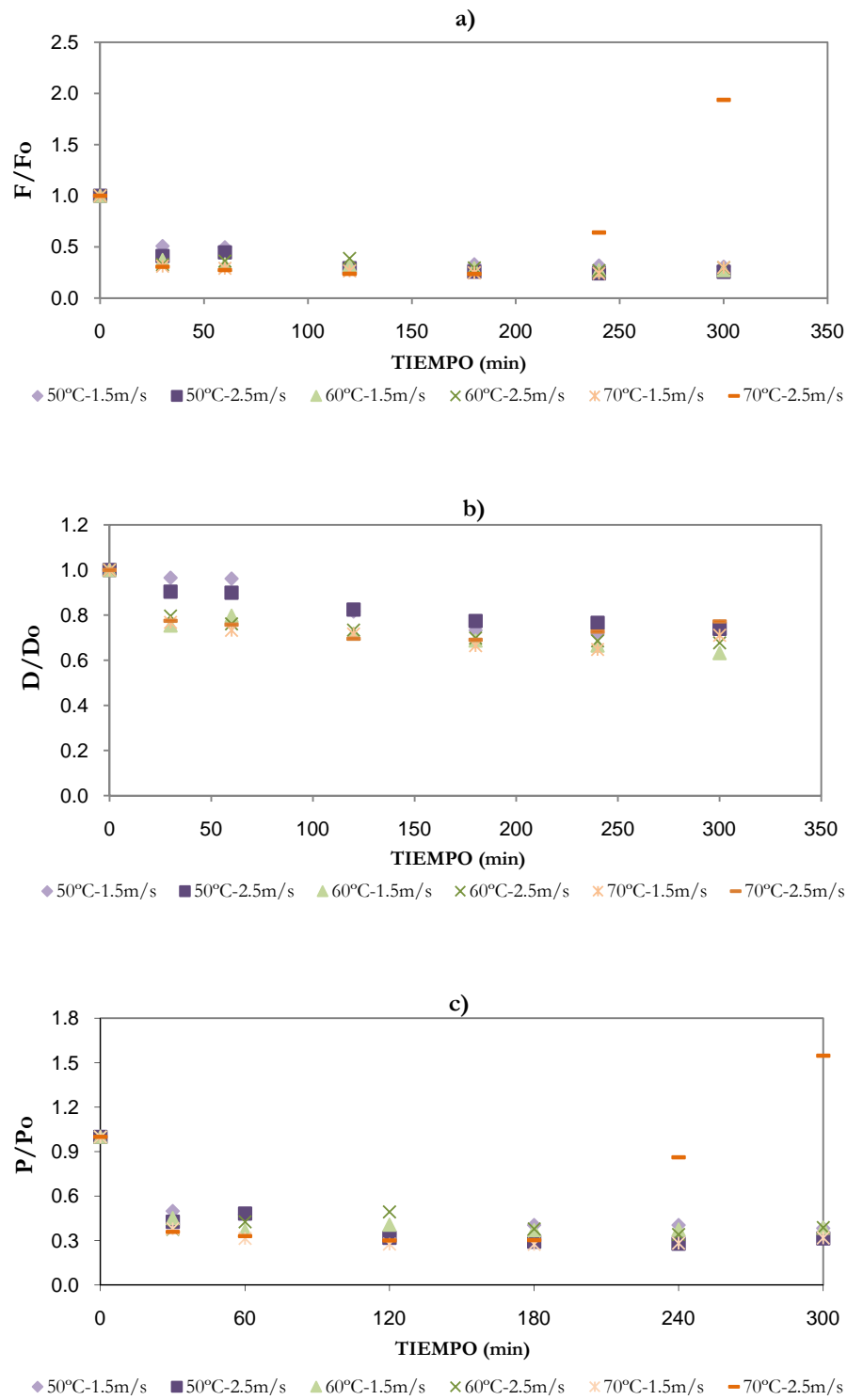
Hay cambios físicos y estructurales que tienen lugar durante el secado de frutas mediante aire caliente, generando modificaciones en la distribución espacial y estructura de los constituyentes. Lewicki y Drzewucka-Bujak (1998), quienes trabajaron en manzanas y zanahorias, observaron que el secado por convección causó cambios importantes en el tamaño y distribución de las células sobre el material estudiado.

El comportamiento de las propiedades físicas durante el secado de frambuesas fue evaluado en términos de firmeza, resistencia a la ruptura (deformación) y rigidez en función del tiempo. Durante el procesamiento de las frambuesas el comportamiento de la firmeza, deformación y rigidez, hasta los 180 min de secado, fueron similares independientemente de las condiciones utilizadas, como se observan en las Figuras 28a-b-c, respectivamente. Luego de ese tiempo, se registró una tendencia constante de estas propiedades en todos los tratamientos aplicados, excepto en las muestras expuestas con la mayor temperatura (70°C) y velocidad de aire (2.5 m/s), donde a partir de los 240 min de proceso se percibió un incremento de las mismas.

En el transcurso de las pruebas, las muestras fueron extraídas a diferentes tiempos y se percibió la formación de una costra sobre la superficie de los frutos. Los frutos con alto contenido de agua, mostraron una costra frágil lo cual hizo que sean menos resistentes a la ruptura, además de presentar menor firmeza y rigidez.

En cuanto a las muestras que tenían menor contenido de agua, la costra formada fue más rígida y firme, lo que hizo que se requiriera de mayor fuerza para su ruptura y presentara mayor deformación, es decir, mayor desplazamiento en su punto de ruptura.

La gran firmeza de las muestras se debe a la mayor pérdida de agua generando una concentración de sólidos y alcanzando un producto más resistente a la compresión. La razón que se atribuye a esto es la difusión del líquido presente en el fruto desde su interior hacia la superficie, llevando sólidos con él. El agua en la superficie se evapora, los solutos se concentran y precipitan, dejando una superficie dura y seca (Lin y col., 1998).



**Figura 28-** Comportamiento de las propiedades mecánicas durante el secado de frambuesas mediante aire caliente a)  $F/F_o$ : Firmeza, b)  $D/D_o$ : Deformación y c)  $P/P_o$ : Rigidez.



Contreras y col. (2006) observaron que las pectinas se solubilizaban durante el secado de manzanas e influían, en este caso, en la pérdida de conexión celular y en el incremento del peso molecular promedio de los compuestos solubles; permitiendo obtener productos de estructura más rígida o menos deformables. Similares resultados fueron observados en las muestras de frambuesas secadas a 70°C y con la mayor velocidad de aire (2.5m/s).

A su vez, en la sección 3 mencionamos que durante el secado por aire caliente, las muestras presentan un encogimiento de su estructura por motivo de la eliminación del agua. Bajo estas condiciones, las frambuesas presentaron un mayor grado de deshidratado, por lo tanto, un mayor encogimiento de sus estructuras lo que provocó un incremento de la firmeza.

El análisis estadístico determinó que el tiempo de secado en frambuesas fue el factor que más influyó y la interacción tiempo-temperatura también fue significativa ( $p < 0.05$ ), lo que indica que a mayor tiempo de secado, mayor es el efecto de la temperatura de aire sobre las propiedades de los frutos. Por otro lado, la temperatura y velocidad de aire no influyeron ( $p > 0.05$ ) por sí solas en la firmeza y rigidez pero su interacción fue significativa. La temperatura de aire si tuvo efecto en la deformación de los frutos. Esto indica que el efecto de secado depende de las condiciones de aire que se estén utilizando y que la combinación de ambos parámetros es importante en la selección de las condiciones de proceso.

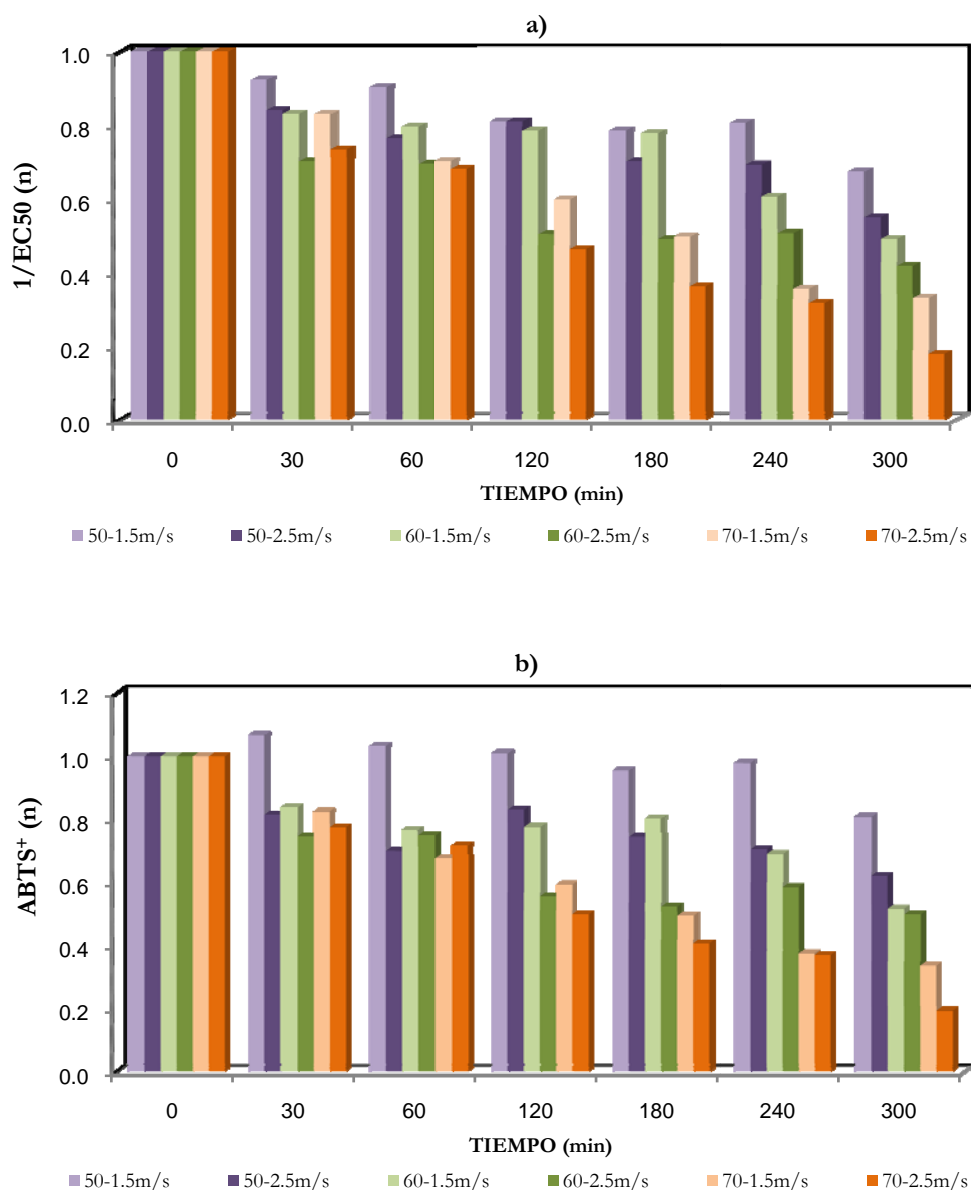
#### 3.2.4. Evaluación de la capacidad antioxidante

La evaluación de la capacidad antioxidante (CA) de las frambuesas nos permite valorar los efectos de las condiciones de secado sobre los componentes nutricionales presentes en estos frutos. Stojanovic y Silva (2007) han informado que las antocianinas y fenoles son los mayores contribuidores de la actividad antioxidante de los berries, con diferentes patrones de comportamiento en respuesta a la temperatura, oxígeno y otros factores de procesamiento. A su vez, Deepa y col. (2007) han encontrado una alta correlación entre la actividad antioxidante de los frutos y el contenido de fenoles totales durante la deshidratación de ají.

Diferentes perfiles de la CA fueron observados como consecuencia de las condiciones de trabajo testeadas, siendo la temperatura y velocidad de aire los factores más significativos ( $p < 0.05$ ). Las Figuras 29a-b muestran los resultados obtenidos mediante los métodos utilizados para la medición de la actividad antioxidante de frambuesas. En ambas figuras se puede observar claramente que al incrementarse la temperatura y velocidad de aire ( $p < 0.05$ ), la degradación de los componentes es mayor a lo largo de los tratamientos. La mayor retención de los componentes antioxidantes fue observada cuando el secado se realizó a 50°C-1.5 m/s presentando una reducción del 32% hacia el final del proceso. La menor retención fue registrada cuando se aplicaron las condiciones más severas (70°C-2.5m/s), obteniendo un 20% de retención de los componentes antioxidantes. Asami y col. (2003) reportaron en el secado de frutilla que temperaturas mayores a 60°C se consideran desfavorables debido a la posibilidad de inducir a una oxidación o descomposición de los componentes antioxidantes, ya que los mismos son muy termolábiles. El proceso de secado por lo general produciría un agotamiento de los antioxidantes de origen natural en los vegetales y frutas. Tratamientos térmicos intensos y/o prolongados pueden ser responsables de una pérdida significativa de antioxidantes naturales ya que la mayor parte de estos compuestos son relativamente inestables (Lim y Murtijaya, 2007). Sin embargo, Peterson (2001) mostró que los procesamientos térmicos reducen la capacidad antioxidante pero no destruyen los componentes.

Dado que los antioxidantes de las plantas son considerados importantes nutrientes para la medicina preventiva (Ramarathnam y col., 1995) y en vista de la pérdida sustancial de las CA causada por el secado por aire caliente en este estudio y en investigaciones previas, se

debe considerar el uso de procesos combinados (aire caliente-microondas) en la industria para productos que son comercializados como un alimento funcional. Similares observaciones fueron reportadas en el secado de geles de manzanas por Demarchi y col. (2013).



**Figura 29-** Evaluación de la capacidad antioxidante en frambuesas durante el SAC  
a)  $1/EC_{50}$  (n) y b)  $ABTS^+$  (n).

## ARÁNDANOS

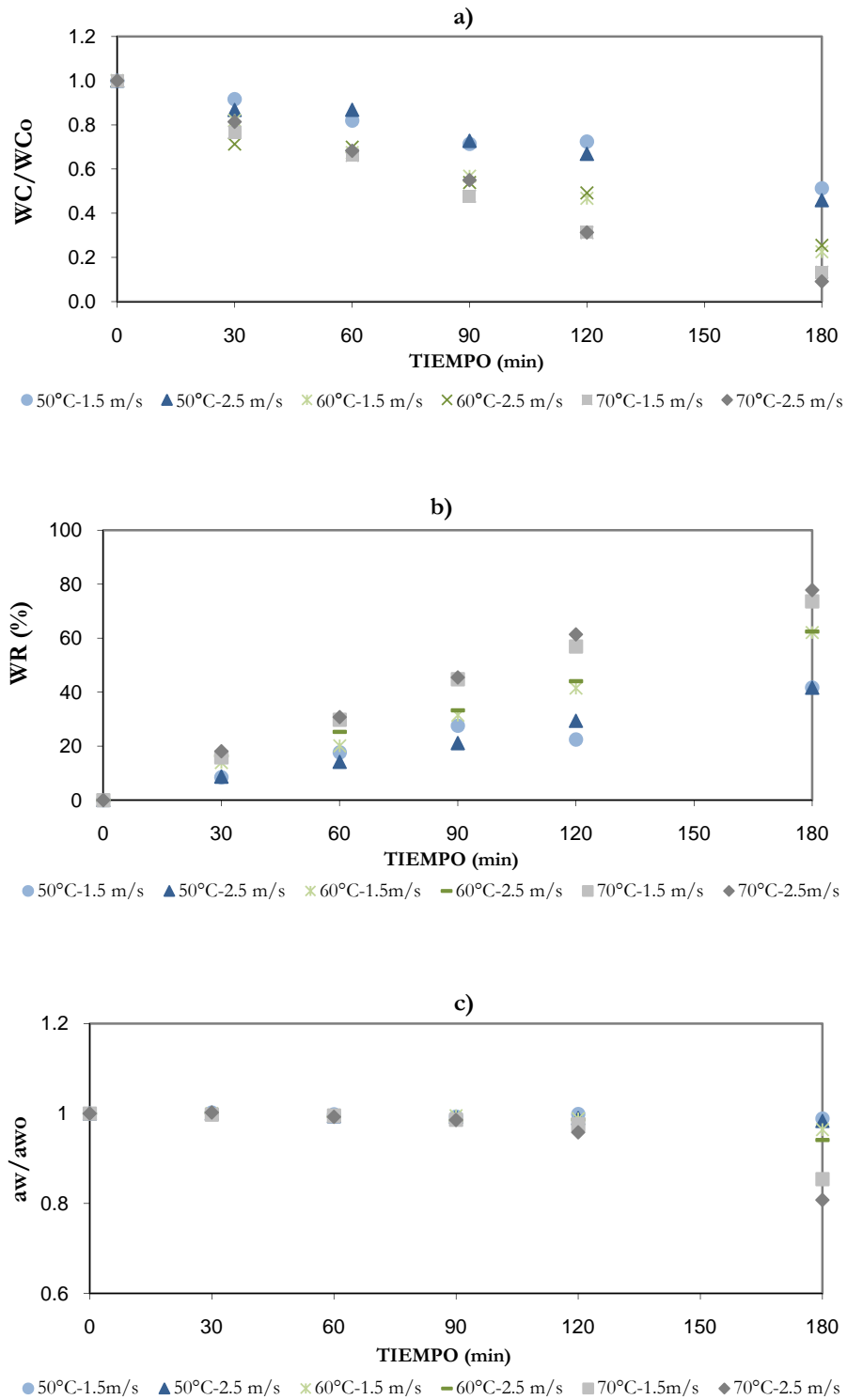
## 3.2.5. Secado por aire caliente

En el procesamiento de los arándanos, al igual que en la deshidratación osmótica, el pretratamiento químico nos permitió lograr una mayor disminución del contenido de agua (WC) con respecto a las muestras sin tratar (Tabla 7). Estos resultados confirman que la exposición de los arándanos en un tratamiento de inmersión incrementa la velocidad de reducción de agua durante el secado, al igual que en otras frutas como damasco, cerezas, uchuvas y uvas (Pangavhane y col., 1999; Doymaz y Pala, 2002a; Doymaz, 2004, 2007b; Vásquez-Parra y col., 2013).

**Tabla 7-** Ensayo preliminar de muestras con y sin pretratamiento químico con respecto a la remoción del contenido de agua (WC).

CONTENIDO DE HUMEDAD % (bh)		
Tiempo (min)	EO 2%- NaOH 0.5%	SIN EO 2%- NaOH 0.5%
90	66.842	81.169
120	47.305	67.374
180	22.897	47.440

Las cinéticas obtenidas durante el secado con aire caliente de la disminución del contenido de agua, pérdida de peso y disminución de la actividad acuosa en función del tiempo se muestran en las Figuras 30a-b-c, respectivamente. Estas figuras presentaron una tendencia clara de la influencia de la temperatura de aire en la velocidad de secado. A medida que la temperatura del aire incrementaba, el tiempo necesario para alcanzar un WC similar tendió a disminuir. Similares características fueron reportados por otros investigadores (Desmorieux y Decaen, 2005; Ait Mohamed y col., 2008; Lemus y col., 2008; Tello y col., 2011).



**Figura 30-** Cinéticas de secado de arándanos de a) contenido de agua (WC),  
b) pérdida de peso (WR) y c) actividad acuosa (aw).

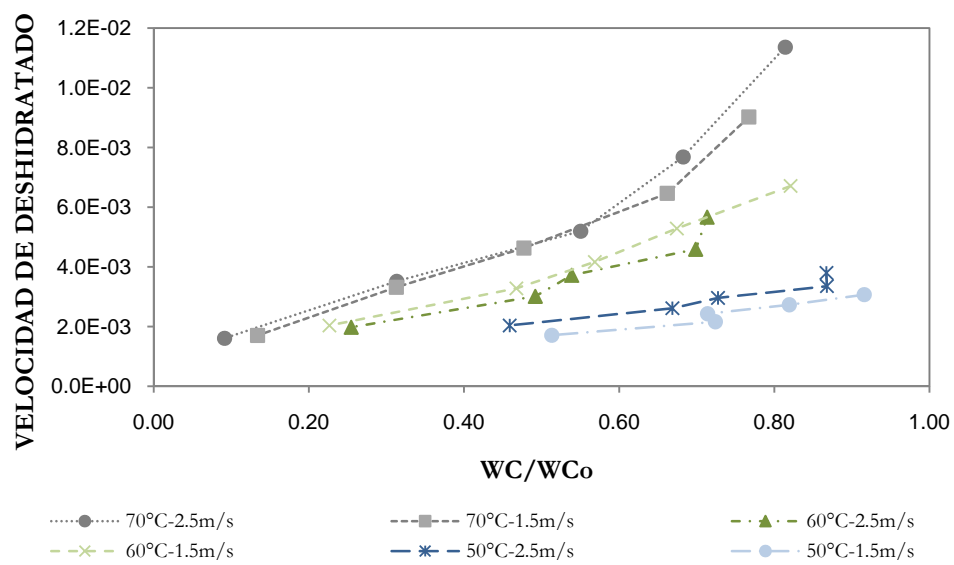
Durante este trabajo, para alcanzar el mismo WC, el tiempo de secado se redujo en un 50% cuando la temperatura del aire se incremento de 50°C a 70°C. En la Figura 30a se puede observar como la disminución del WC fue más pronunciada en el secado a 70°C con respecto a las otras temperaturas. Esto indica, al igual que en la frambuesas, que la temperatura tuvo un efecto directo en el WC y tiempo de secado. Los resultados obtenidos son consistentes con otros reportados en la literatura (Njintang y Mbofung, 2003; Babalis y Belessiotis, 2004; Vega-Gálvez y col., 2008a; Sobukola, 2009; Ihns y col., 2011; Djendoubi Mrad y col., 2012) en la cual la temperatura de aire es considerada el factor más importante que afecta la velocidad de secado. Por otro lado, la velocidad de aire no fue un factor significativo durante los tratamientos de SAC, es decir, secar con una u otra velocidad es indiferente.

El comportamiento de la WR (Figura 30b) y disminución de la aw (Figura 30c) revelaron una relación estrecha con la disminución del WC. Ambos parámetros fueron afectados de igual forma que el WC por las variables temperatura y tiempo de proceso.

Cabe destacar que los productos obtenidos en este proceso poseían una aw de 0.80, siendo necesaria la aplicación de otro método de secado para lograr alcanzar la aw necesaria para evitar el desarrollo microbiano y reacciones químicas que puedan afectar la calidad del producto.

En la Figura 31, se muestran los diferentes comportamientos de las curvas de velocidad de secado bajo todas las condiciones analizadas. En primer lugar-al igual que lo observado en frambuesas- vemos como la temperatura es el factor principal en este método, ya que es claro el efecto de la misma con respecto a la velocidad de deshidratado.

A medida que el tiempo de proceso avanzó, la velocidad de deshidratado fue disminuyendo en función del contenido acuoso de las muestras, comportamiento fue similar al observado en frambuesas (Figura 26). Se puede ver que las cinéticas realizadas a 50°C tienen un efecto menos intenso en la disminución del contenido de agua y, por ende, la velocidad de deshidratado disminuye levemente en comparación a las muestras tratadas a 70°C donde su comportamiento decreciente es más evidente. Esto indica que, según las condiciones que utilizemos, podemos tener distintos regímenes de comportamiento en el secado de frutos.



**Figura 31-** Curvas de velocidad de secado bajo las diferentes condiciones estudiadas durante el presecado con SAC de arándanos.

### 3.2.6. Evaluación de las propiedades ópticas

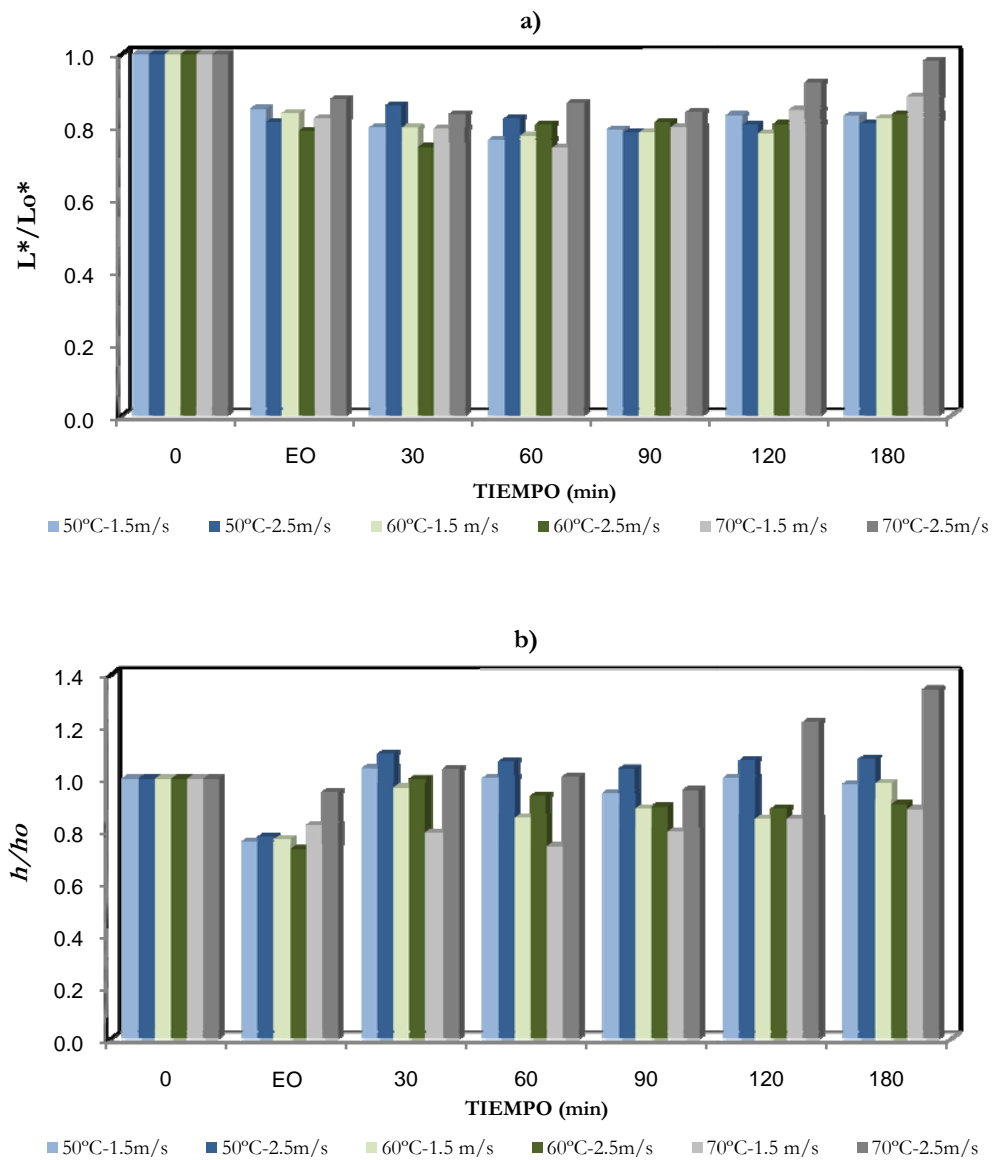
En lo que respecta al secado con aire caliente (SAC), la evolución de la luminosidad y ángulo *bue* fueron analizados en función del tiempo como se muestra en la Figura 32. Durante todos los tratamientos, la  $L^*/Lo^*$  (Figura 32a) disminuyó luego del pretratamiento químico y siguió igual tendencia hasta los 30 minutos de SAC. Posterior a ese tiempo, se distinguió una tendencia constante a medida que el tiempo de proceso era mayor, a excepción del secado a 70°C, donde se observó una tendencia levemente creciente con el avance del tratamiento. Por otro lado, a partir de los 90 minutos, la tasa de velocidad de los cambios de este parámetro fue más evidente a medida que la velocidad y temperatura de aire aumentaban ( $p < 0.05$ ).

Con respecto al parámetro *bue*, en la Figura 32b se observaron cambios significativos con la temperatura de proceso. Cuando las frutas fueron sometidas a 50°C y 60°C, el parámetro *b/bo* aumentó en los primeros 30 minutos de secado, manteniéndose constante durante el transcurso del SAC. Al mismo tiempo, la velocidad de aire más alta (2.5 m/s) afectó en mayor magnitud que la menor velocidad (1.5 m/s). De esta manera, el incremento de este parámetro significó un corrimiento del tono del color de los frutos hacia las tonalidades rojizas observado en el esquema de CIELAB (sección 2).

Asimismo, en el secado a 70°C se registró que a través del tiempo y a mayor velocidad de aire el efecto sobre el parámetro *b/bo* fue más significativo, presentando una tendencia creciente. Esto indicaría una posible decoloración del color original en la superficie de los frutos por efecto de la degradación de los pigmentos naturales frente a las altas temperaturas. El efecto de la temperatura sobre el color superficial de los frutos fue concordante con Vega-Gálvez y col. (2009) en el secado de ají rojo y Yemmireddy y col. (2013) en el secado de arándanos.

Vega-Gálvez y col. (2009) informaron que los cambios de color en el secado con altas temperaturas son debidos al efecto de las mismas sobre los componentes termosensibles como las proteínas, carbohidratos, vitaminas, pigmentos, entre otros. El análisis del parámetro *bue* determinó que todas las variables de proceso fueron significativas ( $p < 0.05$ ), debido a la citada inestabilidad de los pigmentos frente a las altas temperaturas. Sin embargo, las modificaciones de este parámetro no fueron percibidas visualmente, por lo que podríamos determinar que el SAC no afectó en grandes proporciones la tonalidad de los frutos.





**Figura 32**– Evaluación del color durante el secado por aire caliente de arándanos bajo las diferentes condiciones de proceso a)  $L^*/Lo^*$  y b)  $h/ho$ .

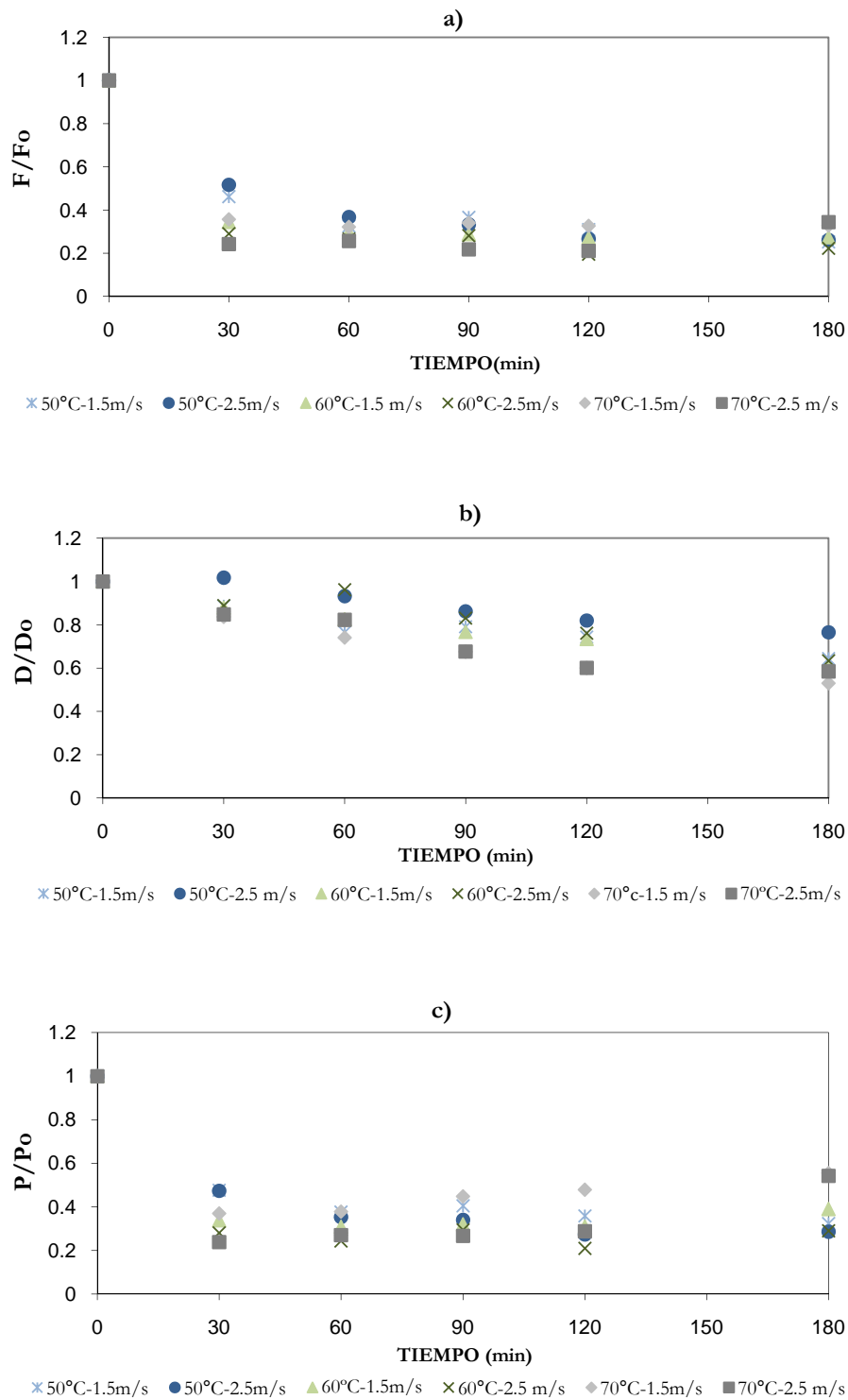
### 3.2.7. Evaluación de las propiedades mecánicas

Las respuestas mecánicas de las muestras deshidratadas pueden ser resultado del comportamiento de la matriz celular y de la fase líquida interna del tejido que contiene a los sólidos solubles, ambas con diferente interacción con el agua (Contreras y col., 2005). Dependiendo del contenido en agua, de los cambios en la pared celular así como de la composición de la fracción hidrosoluble pueden observarse diferencias en el comportamiento mecánico del tejido.

En el procesamiento de arándanos (Figura 33) los frutos fueron menos deformables a medida que el tiempo de secado era mayor, independientemente de las condiciones aplicadas. Por otra parte, la firmeza y rigidez presentaron diferentes comportamientos. En todas las pruebas de secado, a partir de los 30 minutos, los frutos perdieron firmeza y rigidez de manera considerable. Posteriormente, los valores de firmeza se mantuvieron constantes a lo largo de los procesos; sin embargo, la rigidez fue incrementando en mayor grado y en menor tiempo a medida que la temperatura de aire fue mayor.

Lewicki y Jakubczyk (2004) informaron que la diferencia en la resistencia a la deformación de rodajas de manzanas secas, puede ser causada en parte por los diferentes contenidos de humedad en el material seco como así también por las diferentes cinéticas de secado. A su vez, Vega-Gálvez y col. (2008a), informaron para el secado de pimientos rojos, que el reblandecimiento de los frutos se debe particularmente a la pérdida de turgencia y solubilización de sustancias pécticas en la pared celular y laminilla media resultando en la pérdida de la conexión entre células y el colapso de las estructuras celulares durante el proceso de secado.

Todos los tratamientos mostraron efectos importantes sobre la firmeza, rigidez y deformación comparado con las muestras frescas, indicando que las variables de proceso influyeron de manera significativa ( $p < 0.05$ ) sobre los frutos. Los factores que más influyeron fueron el tiempo y temperatura, siendo su interacción significativa ( $p < 0.05$ ). El análisis de medias indicó que el parámetro firmeza fue afectado de manera similar durante el secado a 60°C y 70°C ( $p > 0.05$ ). Con respecto al parámetro  $P/P_0$ , todas las temperaturas trabajadas afectaron en diferentes formas y la temperatura a 70°C presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la deformación de los frutos con respecto a la otras temperaturas.

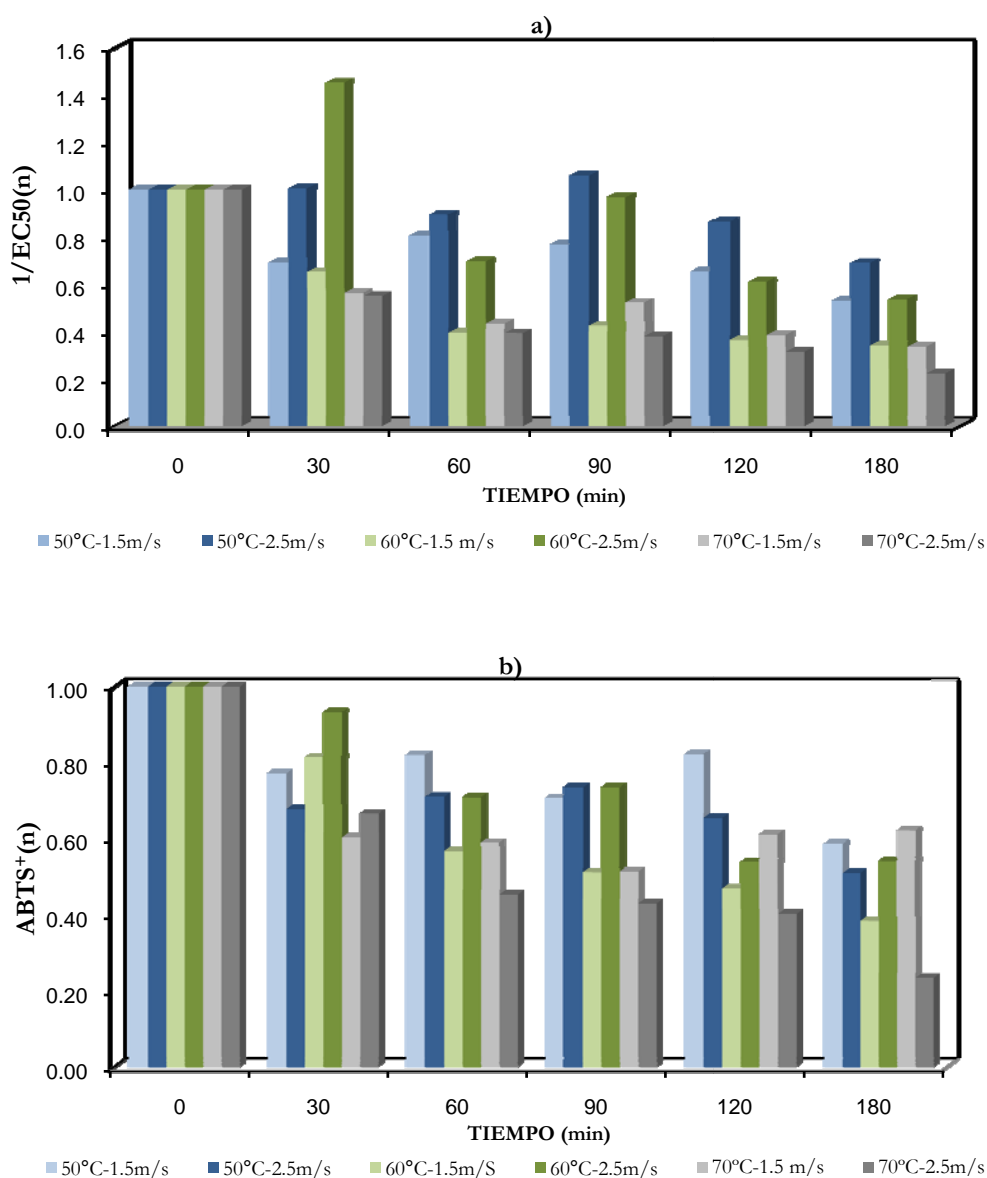


**Figura 33-** Comportamiento de las propiedades mecánicas durante el secado de arándanos mediante aire caliente a) F/F<sub>0</sub>: Firmeza, b) D/D<sub>0</sub>: Deformación y c) P/P<sub>0</sub>: Rigidez.

Las velocidades de aire provocaron efectos en diferente grado ( $p < 0.05$ ) en los tres parámetros mecánicos, observándose un efecto más remarcable en la deformación de los frutos. El tiempo de proceso fue significativo ( $p < 0.05$ ), el parámetro de deformación fue el más afectado disminuyendo a medida que aumentaba el tiempo de proceso, como se observa en la Figura 33. Los demás parámetros mostraron diferencias con respecto al fresco.

## 3.2.8. Evaluación de la capacidad antioxidante

En el procesamiento de los arándanos (Figura 34), la mayor retención de la CA se obtuvo cuando los frutos fueron tratados con la menor temperatura (50°C) y mayor velocidad de aire (2.5 m/s), logrando una retención del 70% de los componentes antioxidantes y la mayor pérdida fue observada en el secado donde se aplicaron las condiciones más severas, con una retención del 20%.



**Figura 34-** Evaluación de la capacidad antioxidante en arándanos durante el secado por aire caliente a) 1/EC50 (n) y b) ABTS<sup>+</sup>(n).

En general, la capacidad antioxidante disminuyó bajo todas las condiciones de proceso. El tiempo necesario para producir una alta degradación de los componentes antioxidantes fue mayor a 50°C que a 70°C, mostrándose así el efecto significativo que tiene la temperatura del aire sobre la pérdida de antioxidantes. En acuerdo con estos resultados, muchos autores han descrito la rápida degradación de componentes fenólicos luego de estar sometidos a altas temperatura durante el secado. (Mejía-Meza y col., 2008; Vega-Gálvez y col., 2009; Ramallo y Mascheroni, 2012).

Con respecto a la velocidad del aire, se observó una particularidad. A excepción de las muestras secadas a 70°C, las muestras sometidas a una mayor velocidad de aire (2.5 m/s) presentaron mayor actividad antioxidante. Cuando el secado se realizó a 60°C-2.5m/s, la CA se redujo en un 50% con respecto al fresco y al aplicar la menor velocidad de aire (1.5m/s) las muestras presentaron una pérdida del 70%. Durante el secado a 50°C, la pérdida de la capacidad antioxidante con la mayor y menor velocidad del aire fue del 40% y 50% respectivamente. Estos resultados concuerdan con Vega-Gálvez y col. (2012) en el secado de manzanas donde reportaron que una mayor fuerza convectiva que actúa en la interface aire-sólido retarda la difusión del calor dentro del fruto. A su vez, Sakihama y col. (2002) informaron que los compuestos fenólicos solubles se encuentran en el citoplasma y en el núcleo de las células y parecen estar protegidas por el material de la pared celular. Esta resistencia interna a la difusión del calor es, sin embargo, un parámetro para considerar cuando la calidad de los productos, durante el tratamiento térmico, está en juego.

### 3.3. CONCLUSIONES

#### FRAMBUESAS

- En las cinéticas de secado de frambuesas se comprobó que la temperatura de aire tiene un efecto directo en la disminución del contenido de humedad y tiempo de secado. Durante el tiempo testado, el contenido de agua alcanzado en el secado a 70°C no se logró con otras temperaturas (50°C y 60°C). En cuanto a la velocidad de secado, se pudo percibir un período de velocidad decreciente en todos los casos y a medida que las variables de procesos incrementaban su intensidad la velocidad era mayor. En cuanto a la pérdida de peso y actividad acuosa, ambos parámetros mostraron una relación estrecha con la disminución del contenido de agua durante el transcurso del tiempo.
- Con respecto al parámetro de color, las muestras presentaron decoloración en su superficie como consecuencia de la degradación térmica de los pigmentos. Al finalizar cada tratamiento a 50°C y 60°C, los frutos presentaban un color más claro y con una tonalidad rosada. En el caso del secado a 70°C los frutos presentaron una tonalidad rojiza pero con mayor claridad que los frutos sin tratar. Este comportamiento indicó ausencia de pardeamiento. Las variables de proceso fueron significativas para el parámetro de luminosidad y el ángulo *hue*. El análisis de medias determinó que las condiciones a 70°C-1.5m/s utilizadas durante este trabajo fueron las que generaron mayores cambios en el color de los frutos.
- En el análisis de las propiedades mecánicas se encontraron diferentes respuestas y el tiempo fue el factor más importante sobre estas propiedades. La temperatura y velocidad de aire no influyeron por si solas pero la magnitud de una de ellas generó que ambas variables combinadas tengan efectos significativos sobre los frutos. Lo mismo ocurrió con la interacción tiempo-temperatura.  
Durante el secado de los frutos se pudo percibir la formación de una costra sobre la superficie de los mismos. En aquellos frutos que presentaban alto contenido de agua, la costra formada era muy frágil, por lo tanto llevó a que presentaran menor deformación, firmeza y rigidez. Cuando la remoción del agua era mayor, esta costra se hizo más rígida lo cual provocó que los frutos tengan mayor deformación, firmeza y resistencia a la ruptura.

- En cuanto a la capacidad antioxidante de las frambuesas, se encontró durante el transcurso del tiempo, una reducción considerable de la misma con respecto al fresco a medida que la temperatura y velocidad de aire eran mayores.
- En el secado con aire caliente, el análisis final de los parámetros de calidad permitió determinar las condiciones ideales para la aplicación de este tratamiento previo al secado con microondas. Las condiciones seleccionadas fueron temperatura de aire 60°C y velocidad de aire 1.5 m/s durante 300 min.

#### ARÁNDANOS

- Las cinéticas de secado de arándanos mostraron que el contenido de agua fue disminuyendo progresivamente con el transcurso del tiempo. A su vez, mostraron una clara influencia de la temperatura sobre el contenido de agua y tiempo de secado. Al aumentar la temperatura de aire se pudo ver que el contenido de agua alcanzado a 70°C nunca se logró a 50°C dentro del tiempo estudiado. En cuanto a la pérdida de peso y actividad acuosa, presentaron una clara relación con la disminución del contenido de agua. Con respecto a la velocidad de deshidratado, fue mayor cuando la temperatura del aire incrementó corroborando lo dicho anteriormente. A su vez, según las condiciones utilizadas, presentaron diferentes comportamientos a medida que el contenido de agua disminuía.
- En el análisis de la evolución de los parámetros de color se observó el color de los frutos luego del tratamiento químico aplicado sobre la piel. Este tratamiento generó en los frutos una superficie brillante y de color rojizo oscuro. Durante el secado, una decoloración de los frutos fue registrada a medida que la temperatura y velocidad de aire fueron mayores, presentando una superficie más opaca, de color rojizo oscuro producto de la degradación de pigmentos en la superficie aunque visualmente esta decoloración no se pudo percibir.
- En cuanto a las propiedades mecánicas de los frutos, la temperatura fue el factor más relevante con respecto a la firmeza, deformación y rigidez de los mismos. Luego de cada tratamiento, los frutos presentaron menor firmeza, rigidez y deformación desde los primeros minutos de proceso. Por otro lado, a medida que el tiempo de secado fue mayor, la deformación de los frutos fue disminuyendo. En este caso, los frutos sufrieron



un mayor ablandamiento de su estructura lo cual hizo que la membrana fuera más frágil y se rompiera fácilmente, presentando una menor resistencia a la ruptura.

- En la Capacidad Antioxidante de los frutos se observó que la temperatura fue el factor que más influyó, siendo el secado a 70°C el que presentó una mayor degradación de la misma. En arándanos, la velocidad de aire más baja provocó una degradación mayor de la CA cuando los frutos se secaron a 50°C y 60°C. A su vez, la temperatura de aire hizo que la degradación de los compuestos antioxidantes sea más rápida a medida que la misma se incrementaba.
- Para el secado con aire caliente como pretratamiento se determinaron las condiciones ideales. Cabe destacar que para que los métodos sean comparables se deben aplicar aquellas condiciones que logren igual contenido de agua parcial. Para esto la condiciones seleccionadas fueron: temperatura 60°C, a una velocidad de aire de 2.5 m/s durante 90 minutos.

---

## *4. SECADO COMBINADO CON MICROONDAS*

#### 4. SECADO COMBINADO CON MICROONDAS

El secado es un método tradicional de preservación de alimentos utilizado para la producción de alimentos especiales e ingredientes (Maroulis y Saravacos, 2003). Tal como se ha dicho previamente, este método no solo afecta el contenido de agua de los productos, sino también altera otras propiedades físicas, biológicas y químicas tales como la actividad enzimática, microbiológica, propiedades texturales, sabor, propiedades ópticas, entre otras.

Los tratamientos de secado convencionales pueden generar una degradación térmica indeseable en los productos finales. En comparación con estas técnicas, el secado por microondas ofrece oportunidades como generación de energía uniforme en el volumen, alta conductividad térmica en el interior del alimento, ahorro de energía, saneamiento, control preciso de proceso, rápida puesta en marcha y alta calidad de productos. A su vez, permite reducir el tiempo de secado y previene la descomposición de los alimentos (Zhang y col., 2006). Vega-Mercado y col. (2001) consideraron el uso de microondas como la cuarta generación de la tecnología de secado. En general, el proceso de secado por microondas consiste en tres períodos:

- 1- *Período de calentamiento*: la energía de microondas es convertida en energía térmica dentro del material húmedo y la temperatura de los productos incrementa con el tiempo. Una vez que la presión de vapor en el alimento está por encima de la del medio ambiente, el material comienza a perder humedad pero en tasas relativamente bajas.
- 2- *Período de secado rápido*: se establece un perfil de temperaturas y la energía térmica convertida a partir de la energía de microondas, es utilizada para la vaporización de la humedad. En las estructuras porosas, la velocidad de vaporización de la humedad en diferentes lugares del alimento depende, en gran medida, de la velocidad de conversión de energía térmica a partir de microondas.
- 3- *Período de velocidad de secado reducida*: la humedad local es reducida hasta un punto en que la energía necesaria para la vaporización de la humedad es menor que la energía térmica convertida por el microondas. La temperatura local puede elevarse entonces, por encima de la temperatura de ebullición del agua. Aunque los factores de pérdida de los materiales alimenticios disminuyen con la reducción del contenido de agua, la temperatura del producto puede seguir incrementando, lo que resultaría en un sobrecalentamiento o carbonización de los alimentos.

La utilización del microondas se ha incrementado pero como todo método de secado presenta una serie de inconvenientes que pueden ser corregidos mediante la combinación con un tratamiento previo empleando condiciones menos severas, como por ejemplo la deshidratación osmótica o secado por aire caliente.

Della Rocca y Mascheroni (2011) informaron que los objetivos del uso de métodos combinados de secado se centraban en tres aspectos fundamentales:

1. Mejora de la calidad caracterizada por una o más de las siguientes propiedades:

- Mínima degradación química
- Cambios de estructura y textura poco significativos
- Mínima variación de sabor y aroma
- Obtención del color deseado
- Control preciso del contenido de humedad

2. Protección del medio ambiente encarada a través de:

- Minimización del uso de energía en el proceso
- Reducción de las pérdidas de producto en las corrientes de efluentes

3. Consideraciones económicas entre las que se incluyen:

- Reducción de costos
- Desarrollo de equipos simples, confiables y que requieran poca mano de obra
- Minimización de la proporción de productos fuera de especificación
- Desarrollo de procesos estables capaces de operar en forma continua

Actualmente se emplean diferentes modos de secado combinado que incluyen generalmente dos y raras veces tres de algunas de estas opciones:

- Secado convectivo con aire caliente
- Secado a presión reducida
- Deshidratación osmótica
- Calentamiento por microondas
- Calentamiento por radio frecuencia

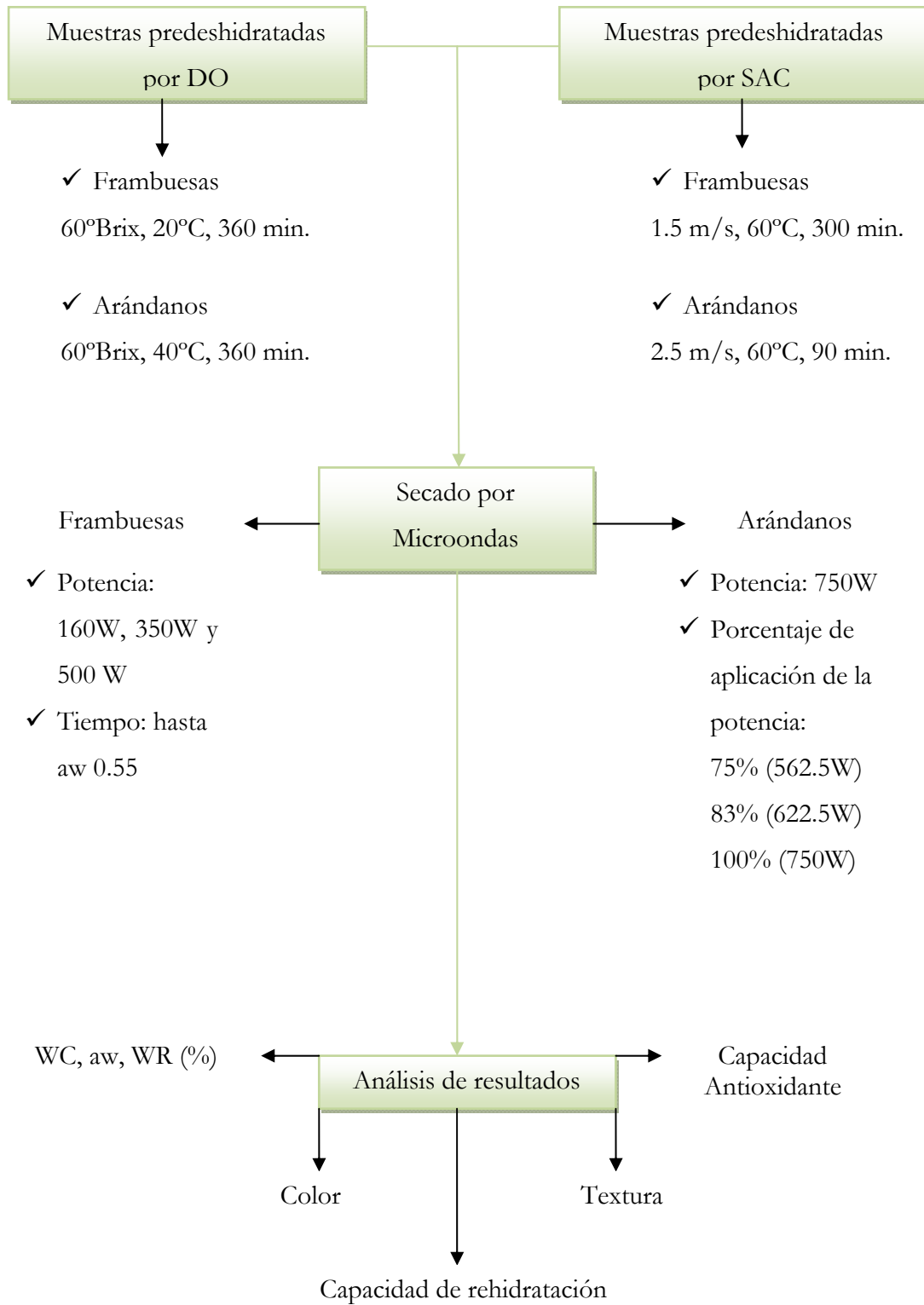
En este capítulo se emplearán la deshidratación osmótica (DO) y el secado con aire caliente (SAC) como pretratamientos de los frutos bajo condiciones ya seleccionadas y luego se

aplicará un secado final por microondas (MO). A su vez, se estudiará la influencia de las variables de proceso de la deshidratación combinada sobre parámetros fisicoquímicos tales como el contenido de agua (WC), pérdida de peso (WR) y actividad acuosa ( $a_w$ ) y sobre algunos atributos de calidad como las propiedades ópticas, propiedades mecánicas, valor nutricional (capacidad antioxidante) y capacidad de rehidratación de los productos finales. En el capítulo 2 ya hemos descripto la importancia del análisis de cada uno de estos parámetros, excepto de la capacidad de rehidratación.

La mayoría de los productos deshidratados son rehidratados antes de su uso final. El proceso de rehidratación es realizado en orden de obtener una adecuada restitución de las propiedades del material fresco cuando el material seco está en contacto con agua (Taiwo y col., 2002). Las características de rehidratación del producto desecado se utilizan como índice de calidad y son indicadores de los cambios físicos y químicos que se ven influenciados por las condiciones de procesamiento, la composición de las muestras, la preparación de las mismas y el alcance de la transformación estructural y perturbaciones químicas inducidas por los procesos de secado. Generalmente, el contenido de humedad de equilibrio en la saturación no llega al contenido de humedad de la materia prima, lo que indica que el procedimiento de deshidratación es irreversible (Krokida y Marinos-Kouris, 2003; Acuña y col., 2006; Acuña, 2008).

## 4.1. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1.1. Diseño experimental



4.1.2. Secado por microondas (MO)

La DO y el SAC de frambuesas y arándanos se realizaron bajo las condiciones y procedimientos experimentales seleccionados en los capítulos 2 y 3. Sobre una porción de estas muestras se analizaron la  $a_w$ , WC, WR, propiedades mecánicas, propiedades ópticas y capacidad antioxidante, el resto fue utilizado para las cinéticas del secado por microondas correspondientes.

Para la construcción de las curvas de cinética, los frutos fueron secados a diferentes tiempos hasta alcanzar un WC del 15% en base húmeda ( $a_w$  de 0.55, aproximadamente). El mismo fue controlado mediante la determinación del peso de las muestras a diferentes tiempos y tomando en cuenta el valor aproximado del WC luego de los pretratamientos y el contenido inicial de agua del fruto para el secado control. Una vez alcanzado el objetivo, las muestras se dejaron enfriar en un recipiente durante unos minutos y luego de pesarlas, fueron fraccionadas para las determinaciones de los distintos atributos de calidad seleccionados para este trabajo.

El equipo utilizado fue un horno de microondas doméstico (origen China, sin modificaciones) de marca Whirlpool, modelo JT 359, cuyas dimensiones interiores son: alto 32.1 cm; ancho 52.9 cm y profundidad 45 cm (Figura 35)



**Figura 35-** Microondas provisto con un autotransformador de salida de potencia variable utilizado en el secado de arándanos.

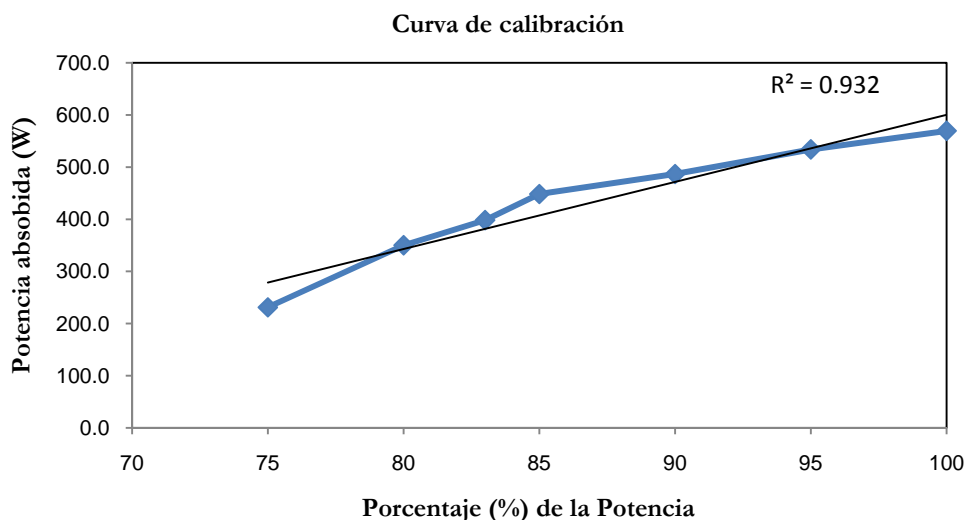
En el secado de frambuesas se utilizaron tres niveles de potencia: 160W, 350W y 500W (potencias preestablecidas en el equipo). Los frutos fueron dispuestos sobre el plato giratorio del equipo y la cantidad de muestra por experiencia fue de  $45 \pm 0.5\text{g}$ . Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

En los arándanos, el secado por microondas fue realizado con el mismo equipo pero con la incorporación de un dispositivo (autotransformador El Toroide, Industria Argentina) que permitió trabajar con la máxima potencia (750W) de manera constante a distintos niveles discretos de potencia (100%, 83% y 75%) mediante un selector incorporado. La selección de los niveles de la potencia fue establecida mediante una curva de calibración por calentamiento de agua. Cada porcentaje equivale a la potencia real aplicada sobre las muestras: 100%-750W; 83%-622.5W y 75%-562.5W

La curva de calibración (Figura 36) se realizó calentando una cantidad fija de agua en el microondas durante 30 segundos. Se midió la temperatura previa y posterior al secado. Mediante la siguiente ecuación se calculó cuanta potencia fue absorbida por el agua:

$$W = m_a * c_p * \Delta T^\circ \quad (12)$$

Donde W es la potencia absorbida en Watts,  $m_a$  es la masa de agua en kg,  $c_p$  es el calor específico en  $\text{J}/(\text{°C} \cdot \text{kg})$  y  $\Delta T^\circ$  es la diferencia de temperatura en  $^\circ\text{C}$ .



**Figura 36-** Curva de calibración para la determinación de las potencias impuestas sobre el alimento.



La masa puesta en el microondas fue de  $24.5 \pm 0.5$  g sobre una bandeja de plástico que encajaba sobre el plato giratorio del equipo de microondas.

#### *4.1.3. Evaluación de los atributos de calidad*

En todas las muestras se analizaron WC, WR, propiedades ópticas, propiedades mecánicas y capacidad antioxidante, mediante las técnicas descritas en el capítulo 2. En tanto la aw fue determinada mediante la técnica mencionada en el capítulo 3.

##### *4.1.3.1. Capacidad de rehidratación*

Las frambuesas fueron rehidratadas por inmersión en agua destilada a temperatura ambiente por 4 horas y los arándanos por 2 horas. El tiempo seleccionado para los arándanos fue tomado en cuenta en base a trabajos de otros autores (Yang y Atallah, 1985; Nsonzi y Ramaswamy, 1998) La relación fruta seca/agua fue de 1:10. Luego del tiempo establecido de rehidratación, las muestras se colocaron sobre papel absorbente para sacar el agua remanente y fueron sujetas al análisis del contenido de agua y textura. La capacidad de rehidratación fue expresada como la relación de peso entre las muestras rehidratadas y el peso de las muestras previo a la rehidratación (Prothon y col., 2001). La capacidad de rehidratación fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{m_r}{m_s} \quad (13)$$

Donde CR es la capacidad de rehidratación,  $m_s$  es masa de muestra seca (g) y  $m_r$  es masa de la muestra rehidratada (g).

Para la comparación de los tratamientos de secado, se trabajó mediante los análisis estadístico ANOVA y la comparación de medias por Tukey, descriptos en el capítulo 2.

## 4.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

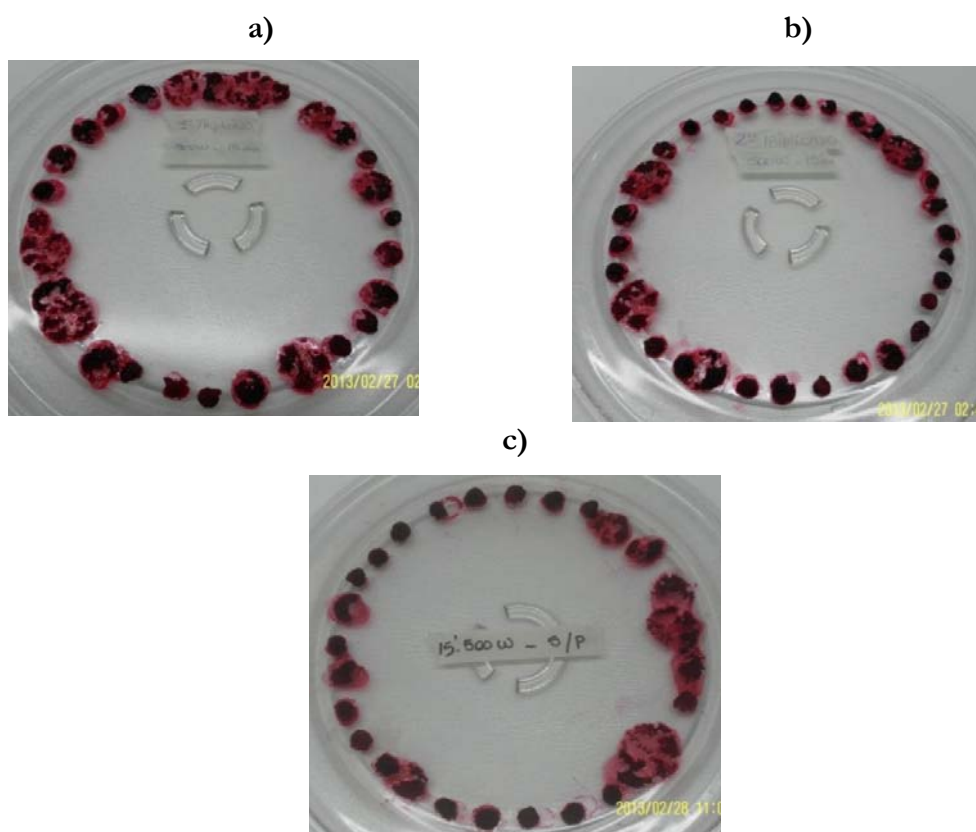
### FRAMBUESAS

#### 4.2.1. Comparación de los métodos combinados

Cada uno de los secados aplicados tanto en frambuesas como en arándanos se llevó a cabo dentro de un período de 8 horas (duración de una jornada laboral), para determinar si tanto los pretratamientos analizados como el secado por microondas (MO) pueden ser métodos factibles en la industria alimenticia para el deshidratado de los frutos.

Por otro lado las condiciones de los pretratamientos fueron seleccionadas en base a la obtención del mismo contenido de agua y menor degradación de los parámetros de calidad, permitiendo así, la comparación de ambos métodos combinados.

En la Figura 37, se puede apreciar el secado de frambuesas pretratadas y sin pretratar (SP) con la máxima potencia (500W) de MO durante 15 min.

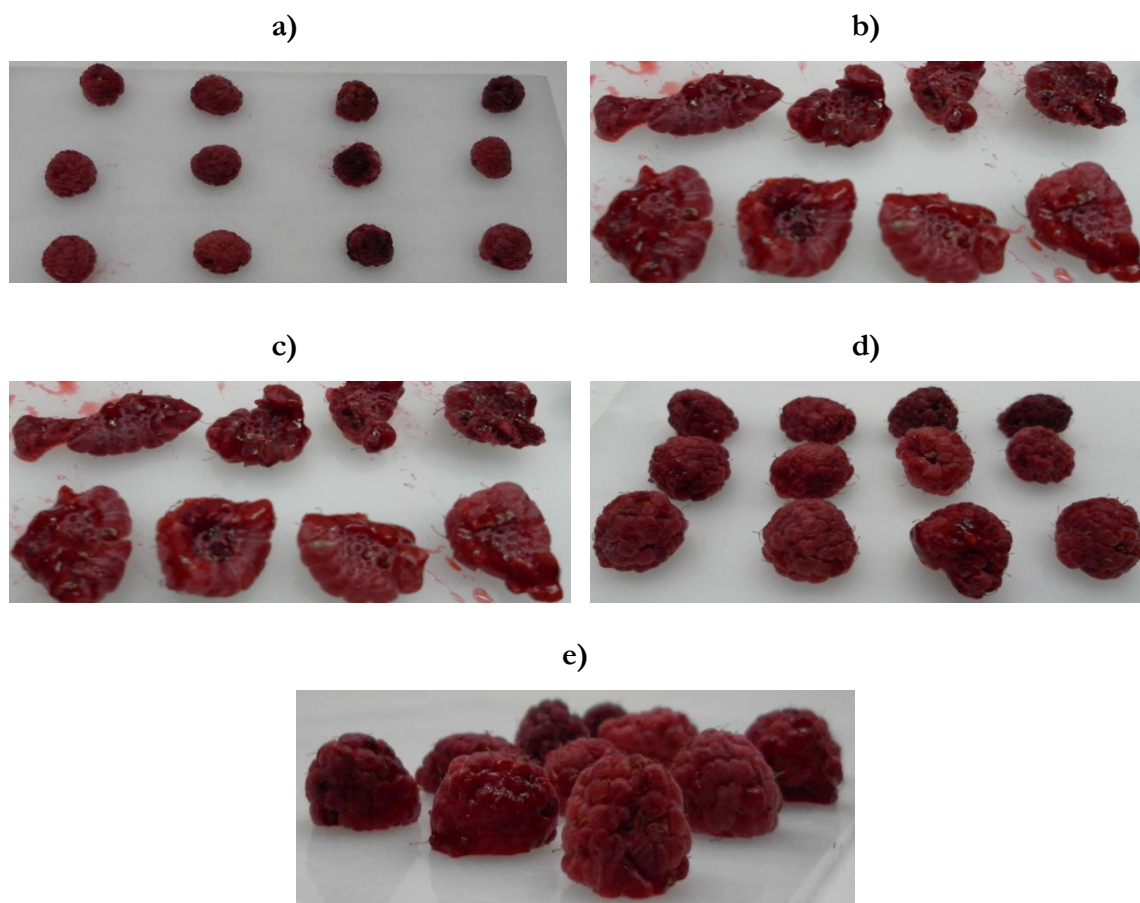


**Figura 37-** Secado por microondas de frambuesas a 500W durante 15 minutos a) y b) frambuesas pretratadas y c) frambuesas sin pretratar.

Es importante aclarar que la disposición en la que se encuentran los frutos en el plato giratorio nos permitió asegurar un calentamiento uniforme de los mismos. Claramente la potencia aplicada, a los pocos minutos de secado, genera una desintegración de la estructura de los frutos en gran porcentaje, mientras tanto, las frutas no afectadas presentaban aún un alto contenido de agua. Por esta razón, se determinó que el secado con la máxima potencia fuera descartado debido a su bajo rendimiento y calidad en el deshidratado de frutas

En lo que respecta a la Figura 38, a modo de ejemplo, se muestran las frambuesas pretratadas por SAC (Figura 38 c-d-e) y sin pretratar (Figura 38 a-b) al final del secado con la menor potencia aplicada (160W). Es claro que el contenido de agua y estructura de los frutos no fueron afectados de manera significativa.

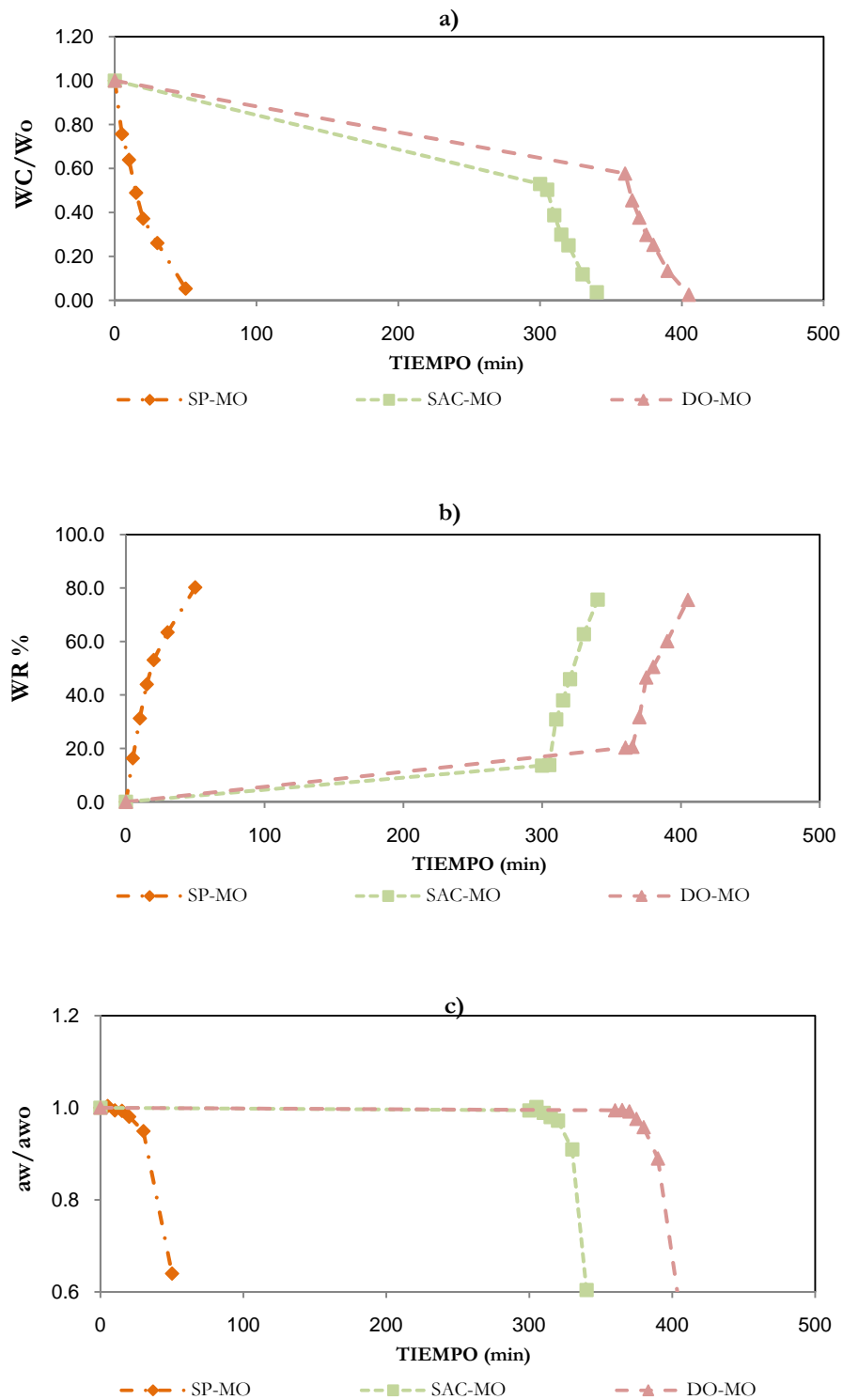
Al final del secado, la temperatura superficial de las frutas fue determinada. Si bien la temperatura del centro de los frutos es mayor debido a que el material a secar puede absorber la energía de microondas directamente y convertirla en calor en su interior (Gowen y col., 2006), la temperatura superficial nos permite dar idea del calentamiento de los frutos. La temperatura alcanzada al cabo de 8 horas fue cercana a los 40°C, insuficiente para la vaporización del agua dentro del fruto. A su vez, el contenido de humedad variaba con gran dispersión según el grado de madurez. Al no hacerse una clasificación detallada debido a que la industria trabaja con el descarte, el mínimo efecto de la potencia era claro en aquellas frutas de mayor maduración, imposibilitando la reproducción de los secados a esta potencia. Por lo tanto, el secado a 160W también fue descartado ya que no se considera ideal por el mayor tiempo de proceso que lleva remover el WC, lo que generaría altos costos de producción.



**Figura 38-** Secado por microondas de frambuesas a 160W: sin pretratar (a y b) y pretratadas con SAC (c, d y e) durante 480 minutos.

Por último, la potencia de 350W fue la que permitió lograr un alto rendimiento en el secado de frambuesas a cortos tiempos (Figura 39). En la Figura 39a, se muestra la variación del WC a través del tiempo de proceso para las muestras SP y pretratadas con DO y SAC, teniendo en cuenta la condición final establecida para el proceso ( $a_w$ : 0.55).

En los métodos combinados DO-MO y SAC-MO se observa que el SAC tiene mayor velocidad de secado para alcanzar un WC similar que en la DO y por lo tanto permite alcanzar la  $a_w$  deseada en menor tiempo cuando se aplica el secado por microondas. Sin embargo cuando estos métodos son comparados con el secado control (solo microondas) se puede apreciar que el incremento del tiempo lo generan los pretratamientos analizados, ya que en la etapa final la difusión del agua desde el fruto es igual en todos los casos. El tiempo requerido para alcanzar una  $a_w$  0.55 con SP-MO, DO-MO y SAC-MO fue de 45, 405 y 340 min., respectivamente.

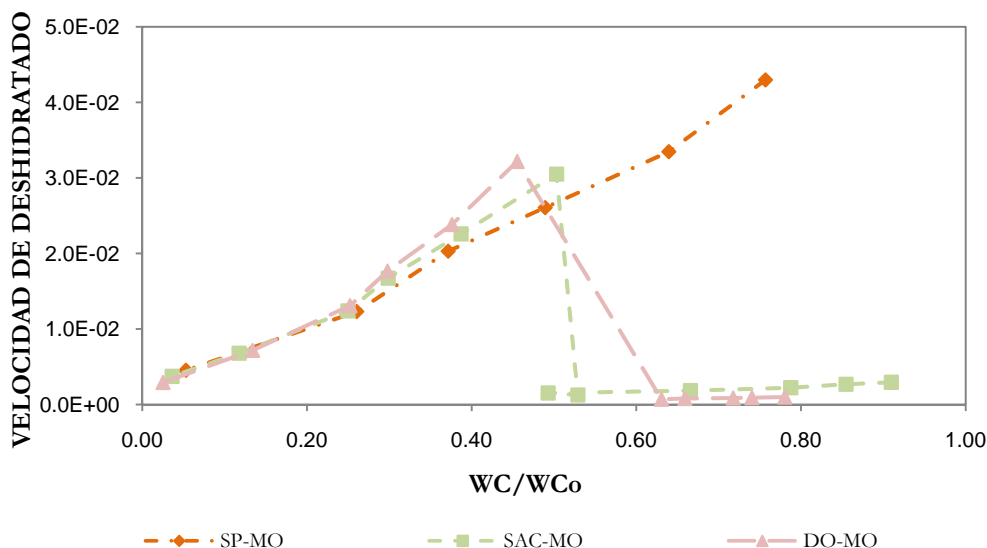


**Figura 39-**Cinéticas de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO) de frambuesas en función del tiempo a) disminución del WC, b) aumento de la WR y c) disminución de la  $a_w$ .

En lo que respecta a la pérdida de peso (WR), a medida que el tiempo avanzó, este parámetro fue en aumento (Figura 39b). Además, se pudo distinguir que las muestras sufrieron una reducción de su tamaño de manera considerable por el encogimiento de las células en los tejidos. La actividad acuosa ( $a_w$ ) presentó una tendencia decreciente durante el transcurso del tiempo (Figura 39c). Es claro que estos comportamientos se deben a la remoción del agua dentro de las células de los tejidos durante el secado.

Durante este trabajo, tanto en frambuesas como en arándanos, la actividad acuosa fue considerada para determinar la estabilidad de las muestras y no como medida de los diferentes tratamientos. Todas las muestras secas fueron medidas a 25°C y tuvieron un rango de  $a_w$  entre 0.4 a 0.6 considerándose como productos secos. Diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) no fueron encontradas para los diferentes tratamientos. Esto es de esperar, siendo que la  $a_w$  está relacionada estrechamente con el contenido de humedad de los productos y todas las muestras fueron secadas a un WC similar. Resultados similares fueron obtenidos por Beaudry y col. (2004).

La Figura 40 muestra las curvas de velocidad de deshidratado obtenidas bajo las condiciones de proceso estudiadas. Es evidente que el comportamiento de las cinéticas es dependiente del método de secado.



**Figura 40**-Curvas de velocidad de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO) de frambuesas en función del contenido de agua.

Observando las curvas, se puede apreciar que el secado control (SP-MO), transcurre en un período de velocidad decreciente. En los métodos combinados se muestra como los pretratamientos presentan una menor velocidad de deshidratación en comparación al secado por microondas. En el capítulo 2 y 3, describimos que ambos pretratamientos transcurrían en un período de velocidad decreciente. Cuando aplicamos microondas se genera un importante incremento de la velocidad de deshidratado y durante el mismo la velocidad también va disminuyendo a medida que el contenido de agua es menor.

Al final de los pretratamientos, los frutos todavía se encontraban con un alto contenido de agua y, por lo tanto, el secado por microondas puede que se comporte como un método de secado único. Este comportamiento de la velocidad, sugiere que la transferencia de masa es gobernada por las propiedades intrínsecas del producto y la resistencia interna de la difusión del agua (Contreras y col., 2008).

Por otro lado, la alta velocidad al inicio del proceso es debida a la mayor absorción de la radiación que se produce en las muestras por el mayor contenido de agua que modifica las propiedades dieléctricas, resultando en un incremento de la velocidad de transferencia de la humedad. Estos resultados son concordantes con Lakshminarayana (2006) en el secado combinado de bayas Saskatoon.

#### 4.2.2. Evaluación de las propiedades ópticas

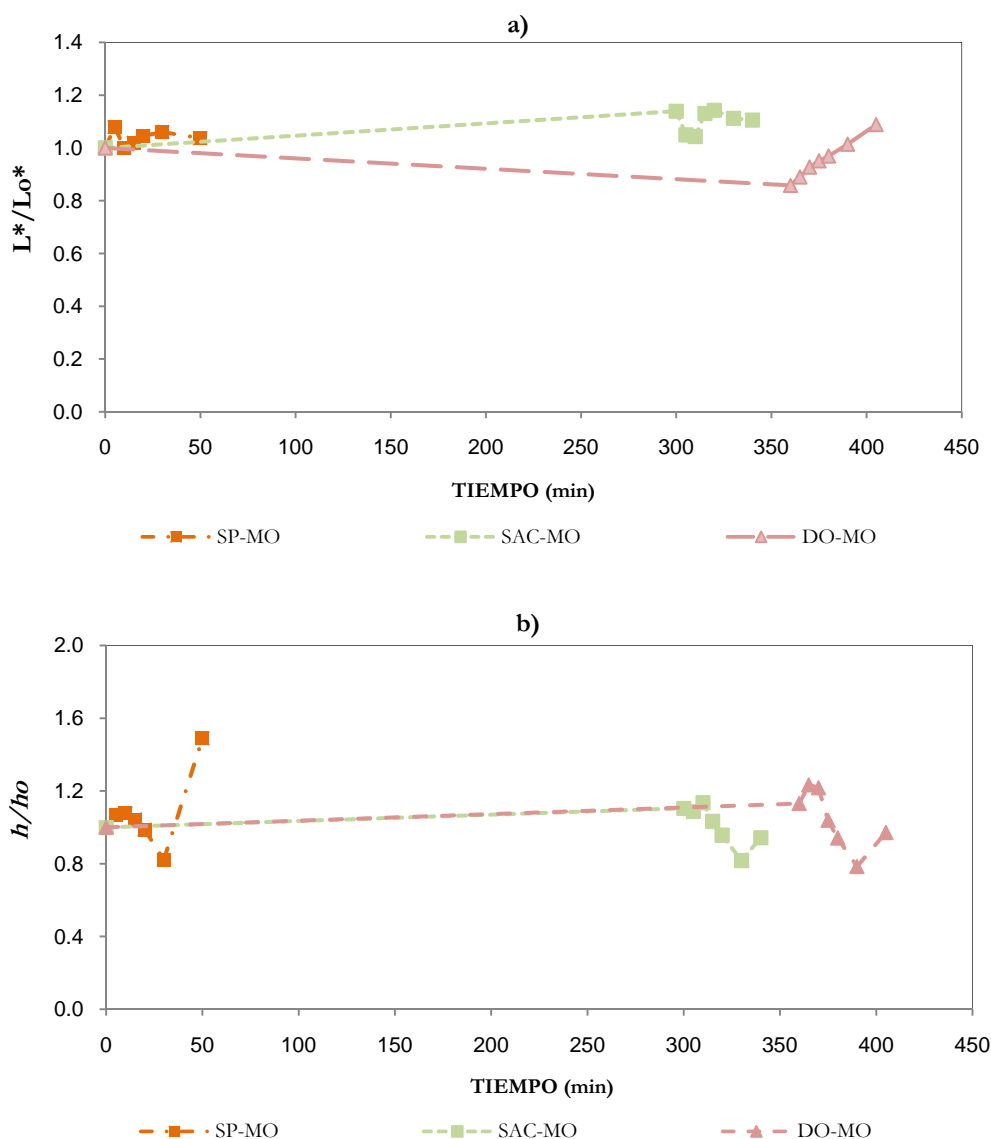
Analizando los resultados del secado control (SP-MO) se pudo apreciar como el parámetro de luminosidad se mantuvo cercano a los valores del material fresco a medida que transcurría el tiempo. Similares resultados fueron reportados por Krokida y Maroulis (1999) para diferentes productos deshidratados. Por otro parte, la tonalidad ( $b/b_0$ ) presentó un comportamiento decreciente hasta los 30 minutos, observándose luego un incremento del mismo hacia el final del proceso. Al analizar estadísticamente dicho parámetro, se comprobó que el cambio generado durante este proceso no fue significativo. Aun así, las variaciones observadas en el  $bue$  pueden atribuirse a las reacciones de pardeamiento no enzimático o degradación de pigmentos como consecuencia del calentamiento en la superficie del productos (Wanyo y col., 2011). Por otra parte, el incremento de este parámetro observado al final del proceso coincide con el mayor porcentaje de disminución del contenido de agua, por lo que podemos decir que dicho incremento se debe a la concentración de pigmentos que perduraron durante todo el secado.

En cuanto al tratamiento SAC-MO, es importante recordar del capítulo 3 que los frutos al ser pretratados con SAC presentaron una mayor luminosidad y aumento del parámetro  $bue$ , adquiriendo un color más claro y rosado en su superficie. Cuando las frambuesas fueron expuestas al secado final, en los primeros 10 minutos no se observó una tendencia clara de la luminosidad ( $L^*/L_0^*$ ), luego de este tiempo se presenta una leve disminución a lo largo del proceso (Figura 41a). En cuanto al parámetro  $bue$  ( $b/b_0$ ), se mantuvo constante al valor obtenido en el SAC hasta los 15 minutos y luego de este tiempo dicho parámetro presentó un comportamiento similar al observado en el secado control. Sin embargo el análisis estadístico determinó que estos cambios no fueron significativos, por lo que podemos concluir que el secado por microondas no provocó modificaciones en el color.

En el secado combinado DO-MO, se produjeron ciertas alteraciones en el color de la superficie de las muestras. Si observamos las cinéticas de los parámetros de color bajo las condiciones seleccionadas en las Figuras 14a-b (capítulo 2), los frutos presentaron un menor valor del parámetro  $L^*/L_0^*$  en relación al fresco y un leve aumento del ángulo  $bue$ , indicando la presencia de un color rojo intenso. Al aplicar el secado por MO, la luminosidad de las muestras comenzó a incrementarse durante el transcurso del proceso. Por otra parte, el ángulo  $bue$  fue variando a medida que el tiempo de proceso avanzaba, mostrando el mismo comportamiento obtenido tanto en el secado control como en el



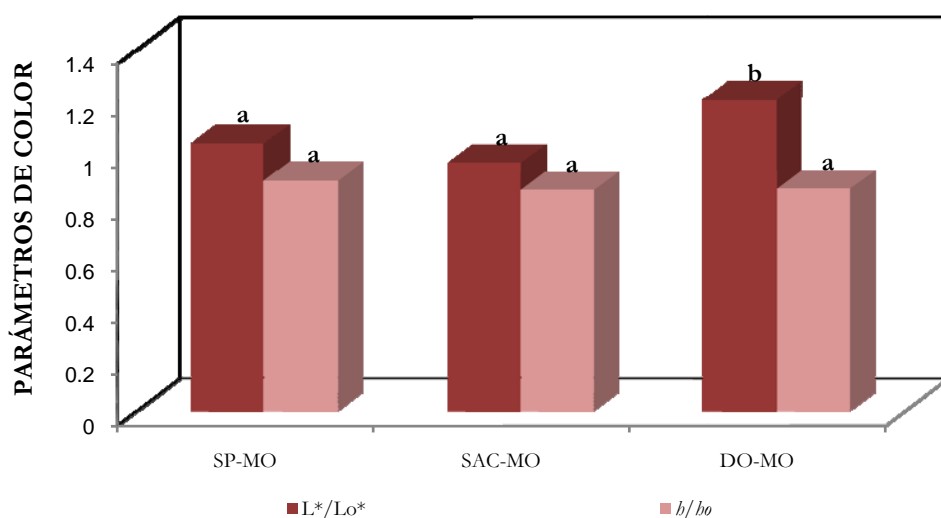
método SAC-MO. El análisis estadístico determinó que el tiempo de proceso fue significativo para la luminosidad, sin embargo con la tonalidad no se encontró efecto.



**Figura 41-** Evaluación de los parámetros de color durante los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) de frambuesas a)  $L^*/Lo^*$  y b)  $h/ho$ .

Si bien a través de la medición instrumental no se encontró afectada la tonalidad de los frutos, la cual puede deberse a la concentración de pigmentos hacia el final del proceso, visualmente se detectó un color más oscuro de la superficie por la generación de la reacción de caramelización del azúcar durante el secado. En cuanto a los valores de luminosidad fueron en aumento atribuyéndose este comportamiento a la presencia de brillo por el azúcar caramelizado.

Al realizarse la comparación de los métodos combinados con respecto al secado control (Figura 42) se observó que la luminosidad presentó diferencias significativas en el secado DO-MO. La mayor luminosidad en este proceso se atribuyó a la presencia de brillo sobre la superficie, ya que las otras muestras presentaron colores más opacos. En cuanto a la tonalidad, visualmente se pudo ver que en el DO-MO se generó un oscurecimiento del color rojo debido a la reacción de caramelización por el calentamiento del azúcar y concentración de pigmentos. Sin embargo estadísticamente no se encontraron diferencias significativas con respecto a los otros tratamientos.



Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada propiedad. Nivel de confianza 95 %.

**Figura 42-** Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) en la evaluación de los parámetros de color en frambuesas al final de los tratamientos.

#### 4.2.3. Evaluación de las propiedades mecánicas

Los efectos de los tratamientos combinados y secado control sobre la textura de las frambuesas se muestran en la Figura 43. Todos los valores obtenidos en los diferentes métodos fueron relacionados al fruto fresco correspondiente.

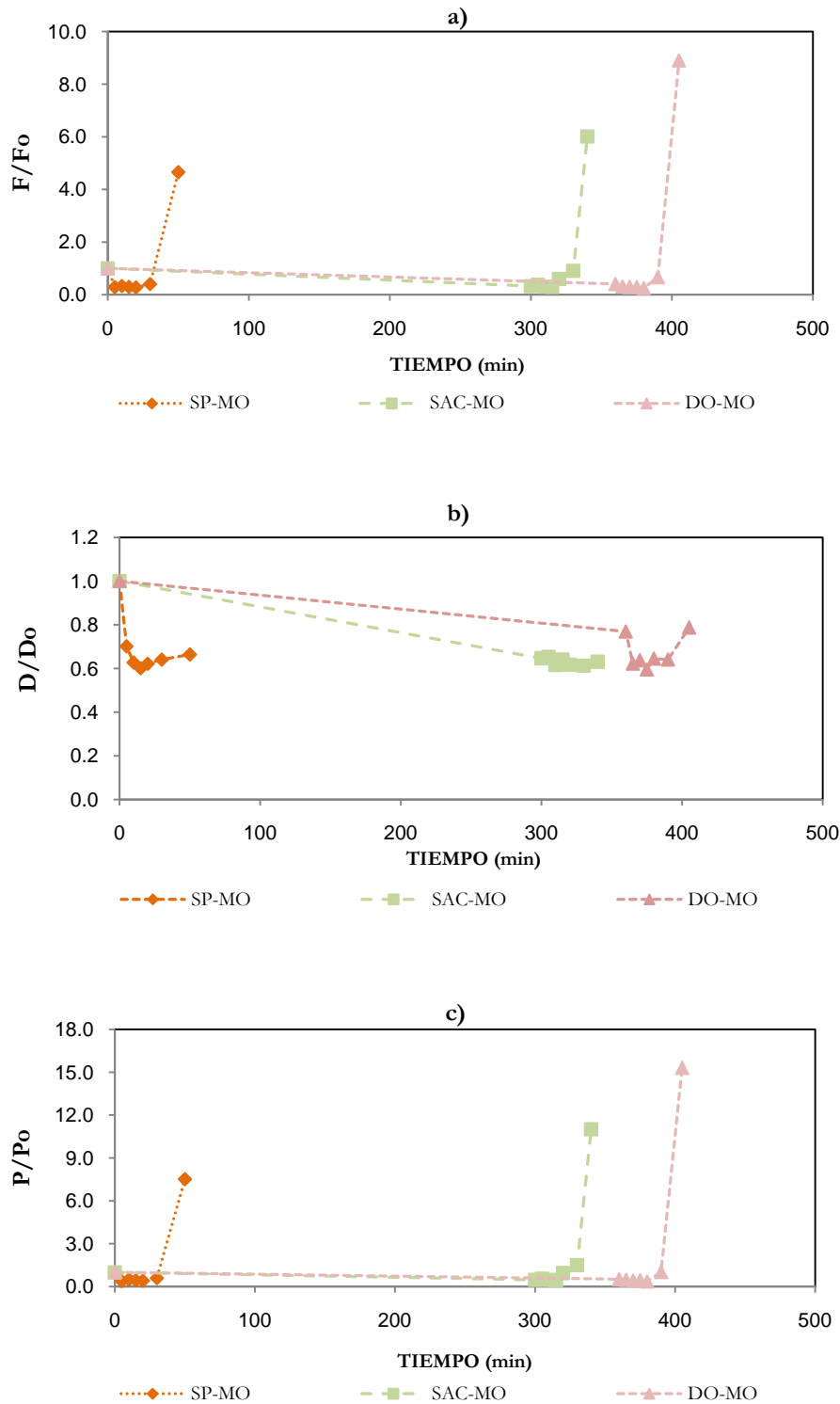
En la Figura 43a, se observa que los frutos sufrieron un ablandamiento de su estructura con los pretratamientos DO y SAC, descritos en los capítulos 2 y 3 respectivamente. Al aplicar el secado por MO, en todos los métodos analizados, se observó un incremento de la firmeza y rigidez (pendiente) siendo mayor aun cuando los frutos se fueron acercando a la actividad acuosa de 0.55. La condición del secado por microondas promovió la rigidez y resistencia mecánica de las muestras secas independientemente del pretratamiento realizado.

Las muestras obtenidas por DO-MO muestran un alto nivel de deformación acompañado de una mayor firmeza y rigidez con respecto a las muestras deshidratadas por los otros métodos. Esto se atribuye al incremento del contenido de azúcar en las muestras osmodeshidratadas que pudo favorecer la generación de una matriz celular adicional compacta durante el secado. Por otra parte, durante la aplicación del microondas, la generación de una fracción de pectina soluble en agua puede explicar el comportamiento mecánico observado. (Contreras y col. 2005, 2007).

En las muestras procesadas bajo el método SAC-MO, se obtuvo una mayor firmeza y rigidez en comparación al secado control. En el capítulo 3 se describió la formación de una costra luego del presecado por SAC. Por lo tanto, la aplicación del secado por microondas promovió el incremento de la firmeza y rigidez de dicha costra a medida que el contenido de agua era menor. A su vez, la menor resistencia a su ruptura (deformación) en comparación a las muestras pretratadas por DO, nos indicó la presencia de una estructura más porosa.

En el secado control (SP-MO), la menor firmeza y rigidez se debe a la generación de una estructura porosa del material a secar como consecuencia del calentamiento y la alta presión interna que facilitó la migración del vapor desde el interior del fruto, lo cual el secado por SAC no genera. Reyes y col. (2007) analizaron la porosidad de rodajas de papas comparando el secado por microondas con el secado convencional (aire caliente) observando similares características. Esto indicaría que las muestras pretratadas por SAC

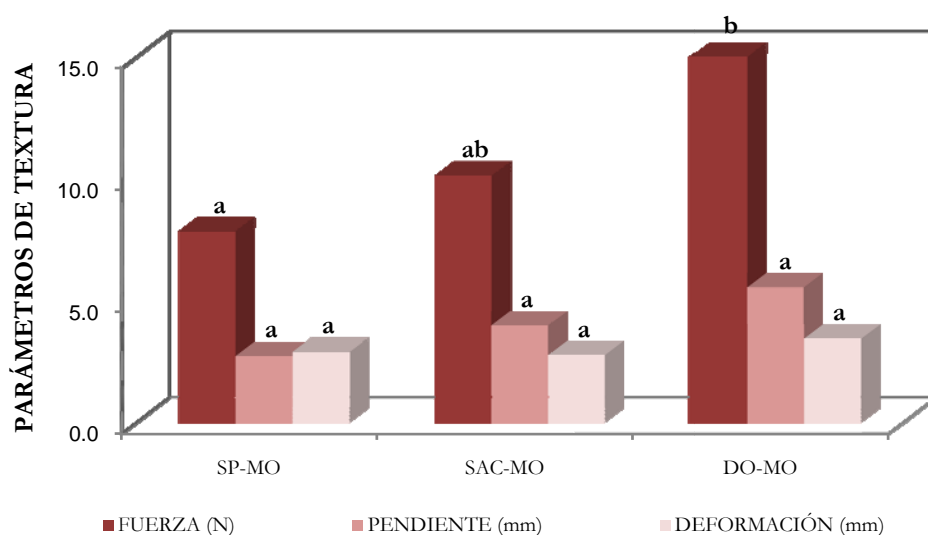
presentaron una estructura con poros de menor tamaño otorgándole mayor firmeza y rigidez en comparación a estas muestras pero con deformaciones similares.



**Figura 43-** Evolución de los parámetros de textura durante los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) de frambuesas a) F/F<sub>0</sub>: Firmeza, b) D/Do: Deformación y c) P/P<sub>0</sub>: Rigidez.

Durante las mediciones de textura, se pudo distinguir en las muestras que el punto de ruptura se desplazaba a mayor distancia, cuanto más secas estaban. Esto significó que las mismas generaban mayor resistencia frente a la sonda de compresión del texturómetro.

Al comparar los métodos de secado (Figura 44), se encontró que las muestras pretratadas por DO presentaron una mayor firmeza y rigidez debido a la formación de una matriz celular más compacta como consecuencia a la caramelización del azúcar proveniente de las soluciones osmóticas. Por otro lado, entre los productos obtenidos por SAC-MO y SP-MO, el SAC tuvo influencia sobre los tejidos de los frutos otorgando mayor resistencia y firmeza comparada con las muestras secadas solo por MO. Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas cuando todos los resultados fueron analizados estadísticamente.



Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada propiedad. Nivel de confianza 95 %.

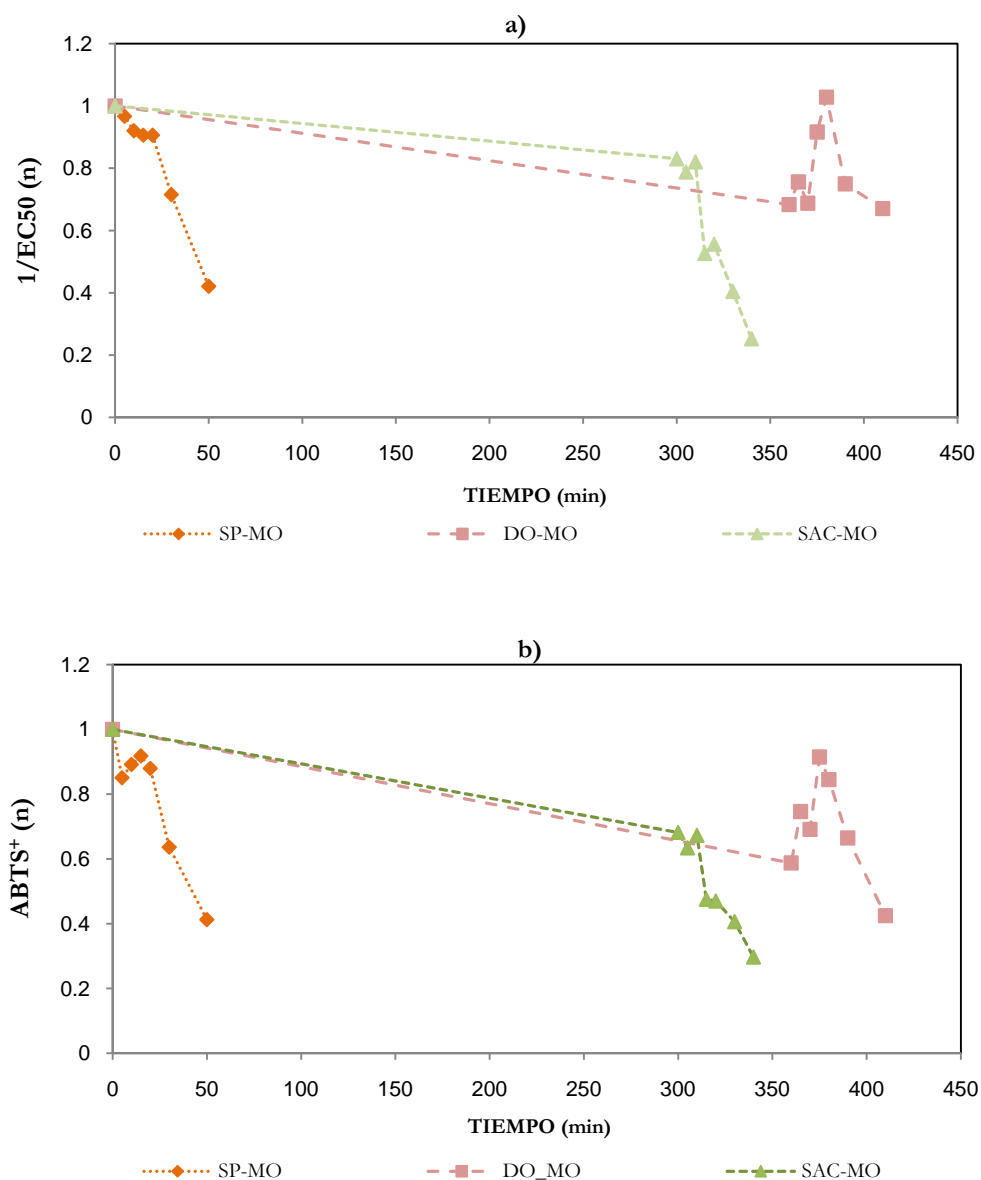
**Figura 44-** Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) en la evaluación de los parámetros de textura en frambuesas al final de los tratamientos.

#### 4.2.4. Evaluación de la capacidad antioxidante

Durante el secado - como ya fue expresado- los componentes químicos de las frutas son afectados por las diferentes variables de procesamiento, como así también su contenido puede variar debido a las transformaciones químicas y bioquímicas, tales como reacciones enzimáticas, hidrolíticas, etc. (Blanda y col., 2009). En las Figuras 45a-b se muestra como todos los tratamientos provocaron una disminución de la actividad antioxidante con respecto al valor inicial. Estos resultados fueron concordantes con Blanda y col. (2009) y Vega-Gálvez y col. (2012). En ninguno de los casos la disminución del contenido de agua causó la concentración de los componentes antioxidantes presentes en el producto fresco.

Tanto en el secado control (SP-MO) como en el secado SAC-MO se distinguió una considerable reducción de la capacidad antioxidante (CA) durante el tiempo de proceso. El porcentaje final de la CA en el proceso SP-MO fue cerca del 40%, mientras que en SAC-MO solo se obtuvo un 30% con respecto al fresco. Estos resultados son acordes con Figiel (2010). Si observamos las Figuras 45a-b, las muestras secadas por SAC-MO ya presentaban menor porcentaje de antioxidantes al final del pretratamiento. Algunos autores observaron que la baja actividad antioxidante está relacionada con una mayor susceptibilidad de oxidación con el aire caliente debido a la presencia de calor y oxígeno. Esto hace que la actividad de la enzima polifenoloxidasas esté favorecida (Figiel, 2010). Por otro lado, Gutiérrez-Ortiz y col. (2008) observaron que la actividad antioxidante de la hierba romero seca en aire caliente fue menor comparada con aquellas secadas por el método de microondas.

En el proceso DO-MO (Figuras 45 a-b), la CA tuvo un comportamiento muy diferente con respecto a lo observado en los demás métodos. Durante la DO, la actividad antioxidante se redujo un 30-40% en las condiciones de pretratamiento seleccionadas. Esta reducción puede atribuirse por el intercambio de sustancias que se genera durante el proceso, donde los componentes antioxidantes solubles en agua se depositan en la solución deshidratante como consecuencia de la salida del agua del interior del fruto (Blanda y col., 2009). Por otra parte algunos autores reportaron que largos tiempos de proceso asociados a bajas temperaturas pueden promover una disminución de la capacidad antioxidante (Li y col., 2006; Garau y col., 2007).

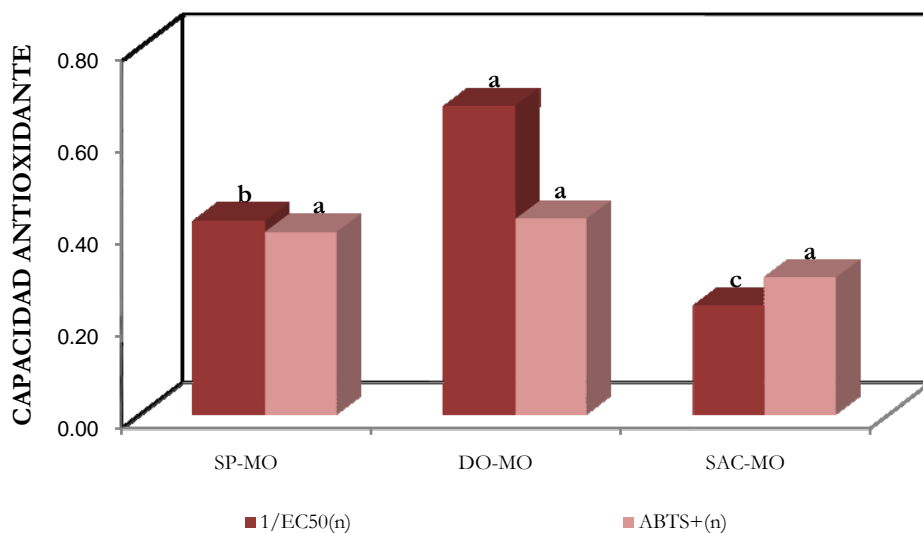


**Figura 45-** Comportamiento de la capacidad antioxidante de frambuesas durante los diferentes secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO).

Cuando dichas muestras fueron luego secadas por microondas, en los primeros 20 minutos del proceso, la CA fue incrementando y luego de ese tiempo comenzó a disminuir hasta el final. Si bien se generó una disminución de los componentes antioxidantes, este método permitió obtener una mayor retención de la actividad antioxidante en comparación a los demás métodos. En general, estos resultados indicarían que la sacarosa infundida dentro y sobre la superficie de las muestras osmodeshidratadas, pudo haber actuado como un agente protector en contra de la degradación térmica de los componentes antioxidantes.

En la Tabla 1 de la sección 1.1.2 se muestra que las frambuesas frescas contienen 40 mg/100g de vitamina C además de la presencia de antocianinas que aportan el color rojo. Estos componentes contribuyen a la actividad antioxidante, por lo tanto, podría indicar que los mismos estuvieron protegidos por la infusión del azúcar durante este método. Similares resultados fueron obtenidos por Erle y Schubert (2001), quienes reportaron que las manzanas osmodeshidratadas conservaron cerca de un 60% de la vitamina independiente de la duración del tratamiento osmótico, luego del secado con microondas a vacío.

En cuanto a la comparación de los diferentes métodos de secado, el método por ABTS<sup>+</sup> no presentó diferencias significativas ( $p>0.05$ ), por el contrario, en el método DPPH si se encontraron diferencias ( $p<0.05$ ). La Figura 46 muestra en DO-MO y SP-MO una actividad antioxidante mayor en DPPH que la obtenida por ABTS<sup>+</sup> y en SAC-MO fue de manera inversa. En el método DO-MO, la capacidad de inhibición obtenida por el método DPPH fue de un 60% en relación a un 42% del ABTS<sup>+</sup>. Estas diferencias pueden deberse al tiempo de reacción que se maneja. En el DPPH el tiempo de reacción es mucho mayor que en ABTS<sup>+</sup>, permitiendo que los componentes antioxidantes interactúen en mayor proporción con dicho reactivo.



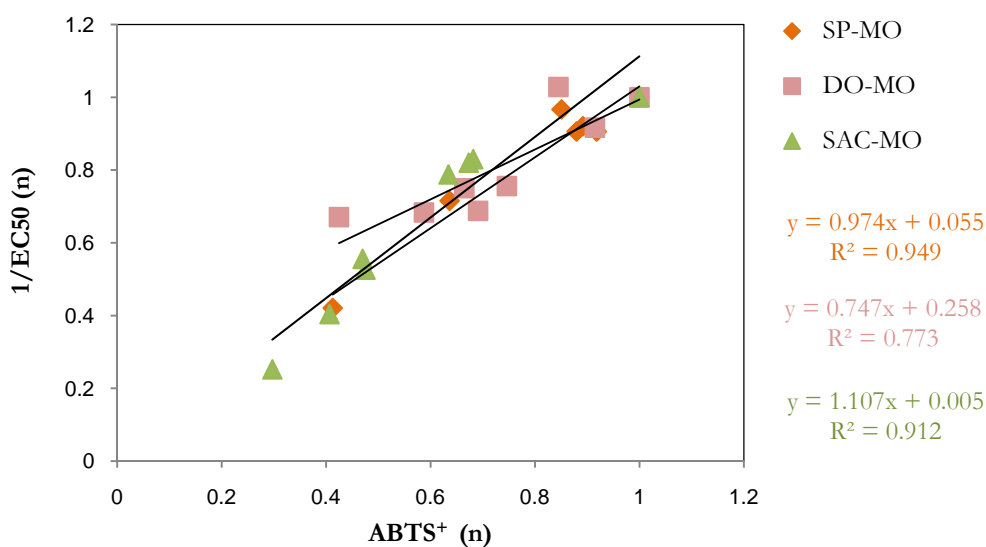
Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada propiedad. Nivel de confianza 95 %.

**Figura 46-** Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SP-MO) en la evaluación de la capacidad antioxidante en frambuesas al final de los tratamientos.



Fernández-Pachón y col. (2006) informaron que hay métodos que cuantifican la actividad antioxidante a un tiempo fijo, con la desventaja de que distintos antioxidantes pueden tener un mismo porcentaje a un tiempo dado pero distinto a otro tiempo determinado. Otros métodos miden la extensión del tiempo de inhibición a un porcentaje de inhibición fijo. En conclusión, a la hora de abordar el estudio de la actividad antioxidante de frutos es aconsejable emplear varios métodos, ya que cada uno ofrece información diferente. Hay compuestos antioxidantes que no reaccionan con determinadas especies oxidantes y sí con otras, pudiéndose obtener así valores dispares entre los distintos métodos.

Aún así, en las Figuras 45a-b se puede apreciar que los ensayos utilizados dan similares tendencias en la actividad antioxidante y presentan una correlación significativa ( $R^2 = 0.75-0.95$ ) como se muestra en la Figura 47. Moo-Huchin y col. (2013) midieron la actividad antioxidante de frutas tropicales mediante ambos métodos ( $ABTS^+$  y DPPH) y encontraron similar correlación entre ambos, indicando que los extractos de frutas muestran actividad comparable en ambos métodos.

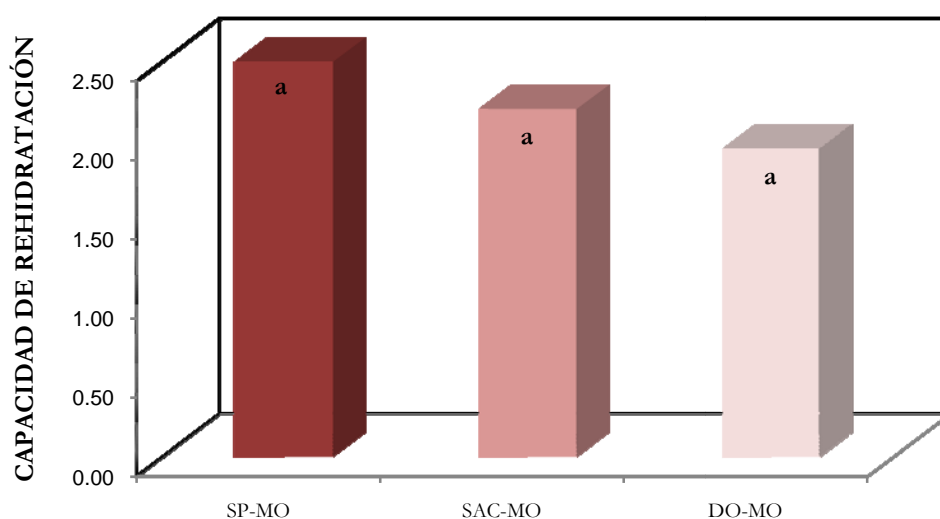


**Figura 47-**Relación entre los métodos utilizados para el análisis de antioxidantes de frambuesas secas.

## 4.2.5. Evaluación de la capacidad de rehidratación

Las características de rehidratación de los productos secos son utilizadas como un índice de calidad e indican la presencia de cambios físicos y químicos durante el secado como influencia de las condiciones de procesamiento.

En la Figura 48 se muestra la capacidad de rehidratación de las frambuesas en función de cada tratamiento. Luego de la rehidratación, los frutos lograron una gran absorción de agua en relación a las muestras deshidratadas, sin encontrarse diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Todas las muestras alcanzaron a rehidratarse en un 90% aproximadamente, lo que indica que el tratamiento con microondas y los pretratamientos permitieron mantener la estructura de los frutos casi inalterada. Similares resultados fueron obtenidos por Maskan (2000) en el secado combinado de bananas con aire caliente y microondas, y secado por microondas.



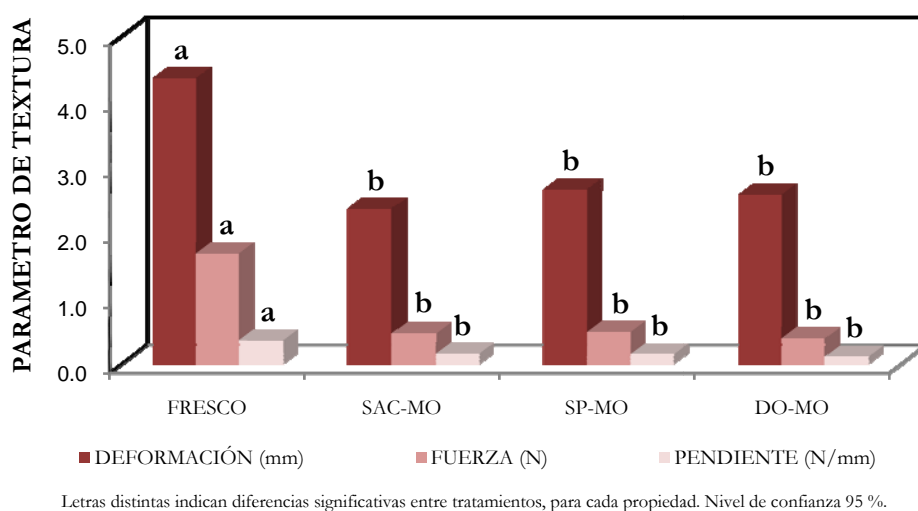
Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada propiedad. Nivel de confianza 95 %.

**Figura 48-** Capacidad de rehidratación de las frambuesas bajo los diferentes métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SP-MO).

Las muestras que menos se rehidrataron fueron aquellas secadas con DO-MO. Esto puede ser explicado por el hecho de que las muestras osmotizadas son menos porosas ya que el azúcar se difunde dentro de los espacios intercelulares y a lo largo de la pared celular. Resultados concordantes con Prothon y col. (2001) en el secado combinado en manzanas.

Estadísticamente estos resultados no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos.

Por otro lado, si bien la rehidratación en sí es un proceso que va dirigido a restaurar las propiedades de la materia prima, es posible observar que el comportamiento mecánico de las muestras rehidratadas es muy diferente al obtenido por la muestras frescas (Contreras y col., 2005). Durante el secado, las muestras deshidratadas tuvieron un cierto daño en su matriz celular, ya que las mismas no pudieron recuperar las características iniciales de textura durante el proceso de rehidratado. Todas las muestras (Figura 49) presentaron menor firmeza, menor rigidez (pendiente) y menor deformación (resistencia a la ruptura) con respecto al fresco, sin encontrarse diferencias significativas entre los tratamientos.

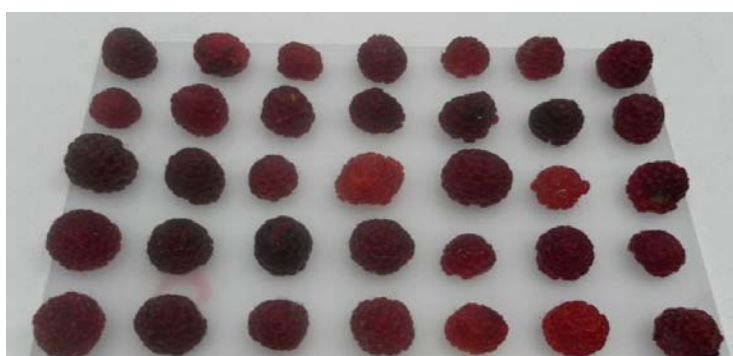


**Figura 49-** Evaluación de los parámetros de textura en las frambuesas rehidratadas.

4.2.6. Evolución de las muestras desde el fresco hasta la rehidratación

A continuación, en las Figuras 50, 51 y 52 se presentan fotografías de los frutos en las distintas etapas de procesamiento. En cada uno de ellas se muestran como los mismos fueron afectados por las condiciones de proceso, presentando diferentes características dependiendo del tratamiento aplicado. Por otro lado, cuando las muestras fueron rehidratadas alcanzaron el tamaño y forma similar al del fruto fresco. Sin embargo, los parámetros de textura analizados demostraron la existencia de un daño estructural irreversible.

a)



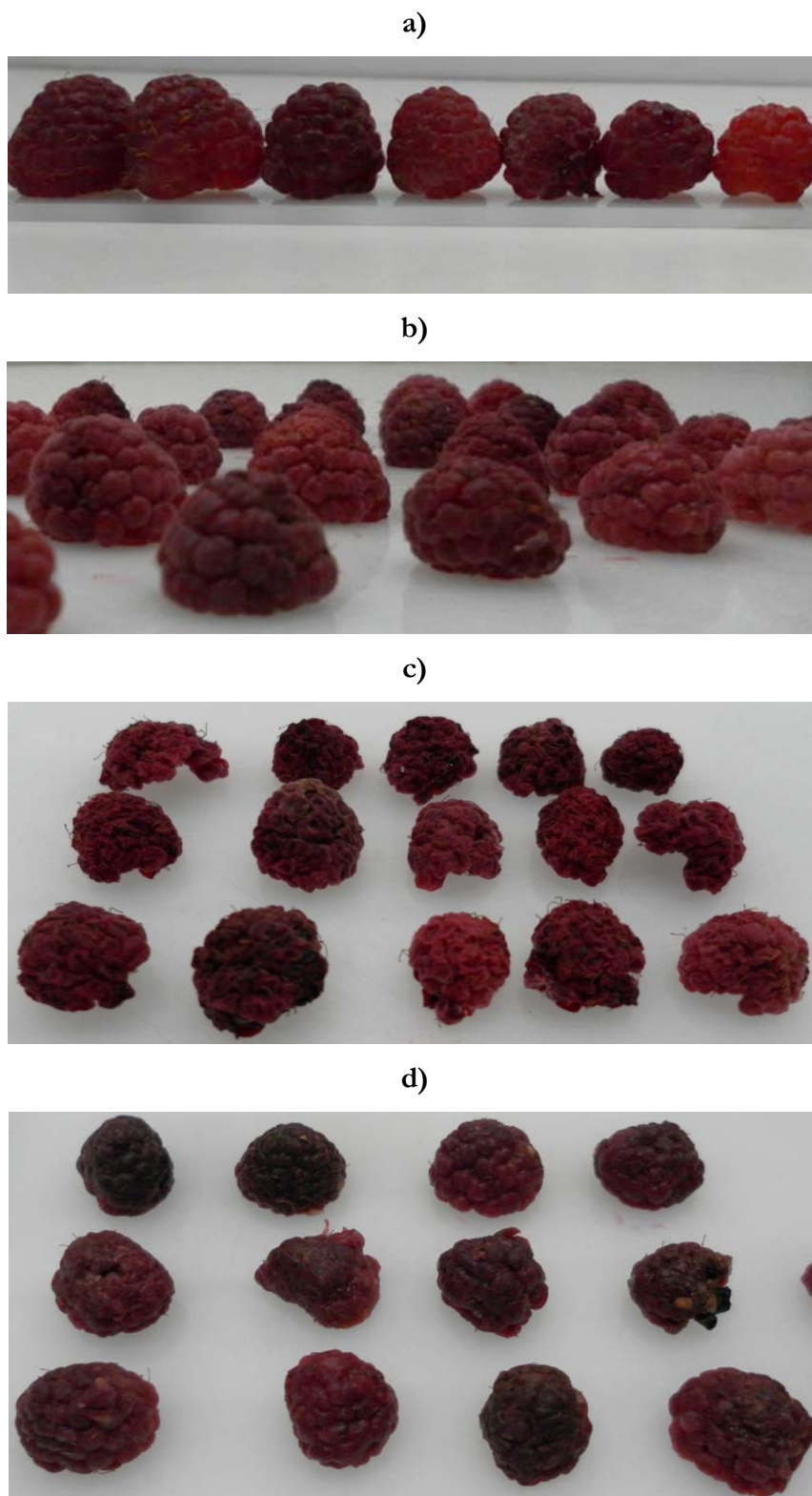
b)



c)



**Figura 50-** Evolución de las muestras deshidratadas por microondas sin pretratar y rehidratadas, a) Frescas, b) Deshidratadas y c) Rehidratadas.



**Figura 51-** Evolución de las muestras deshidratadas por microondas pretratadas con SAC y rehidratadas, a) Frescas, b) Predeshidratadas, c) Deshidratadas y d) Rehidratadas.

a)



b)



c)



d)



**Figura 52-** Evolución de las muestras deshidratadas por microondas pretratadas con DO y rehidratadas, a) Frescas, b) Predeshidratadas, c) Deshidratadas y d) Rehidratadas.

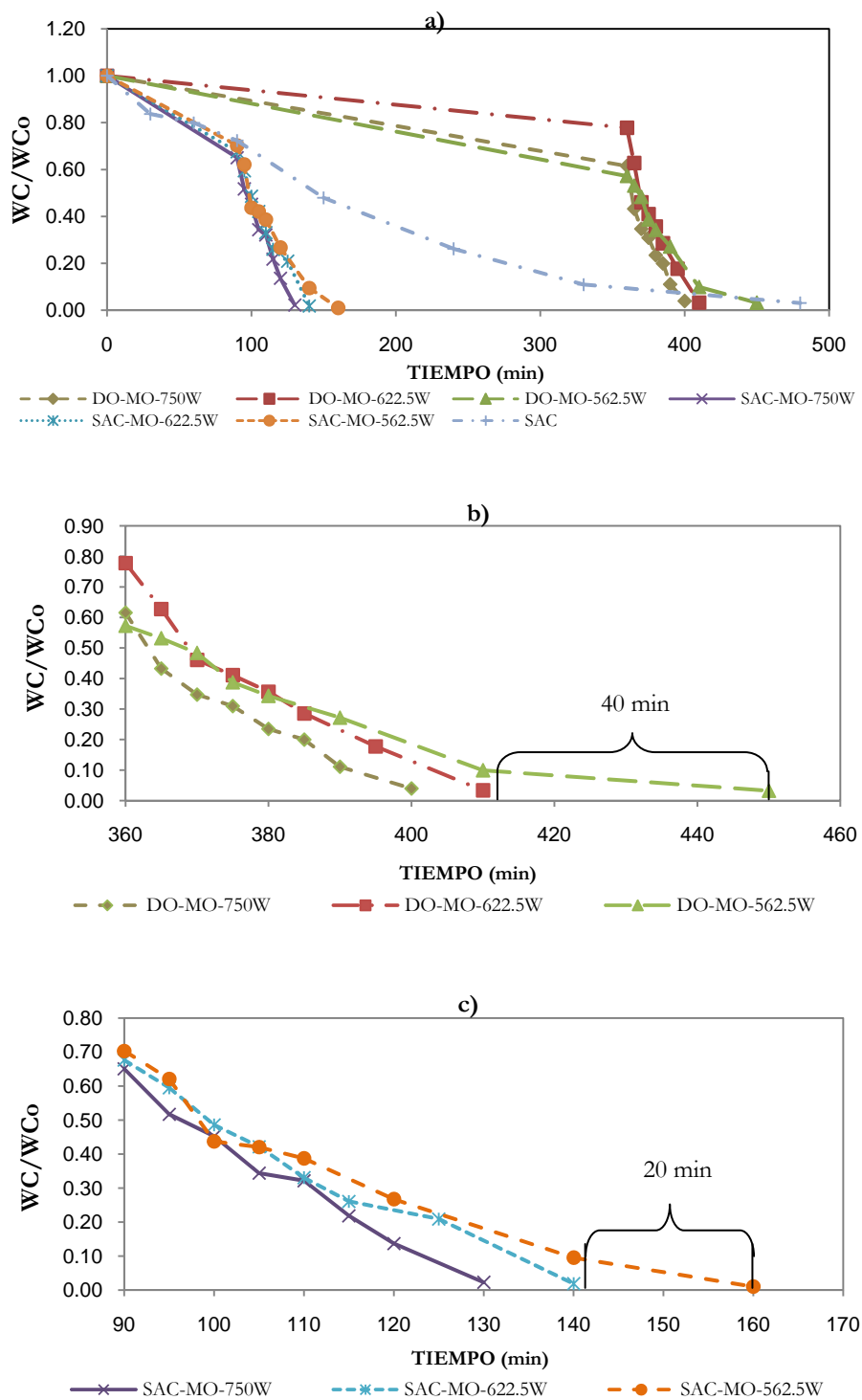


## ARÁNDANOS

### 4.2.7. Comparación de los métodos combinados con microondas

Las muestras osmodeshidratadas (DO) o presecadas con aire caliente (SAC) fueron sometidas a secado por microondas (MO) para alcanzar la condición final establecida para el proceso, mencionada en la sección 4.2.1. En la Figura 53a se analizan las cinéticas de secado en función del tiempo correspondiente a las diferentes combinaciones de tratamientos y secado control. Es importante aclarar que este último se realizó con SAC porque al aplicar microondas, los arándanos perdían su integridad estructural debido al aumento de la presión de vapor dentro del fruto como consecuencia de la baja permeabilidad de la piel (aun cuando se aplicó el tratamiento químico con EO) y esto hacía que el fruto se desintegrara.

Para las experiencias, en la sección 4.1.2 se describió que el equipo microondas fue provisto de un dispositivo autotransformador permitiendo que trabaje con potencia continua de manera similar al proceso industrial. En los microondas domésticos, cuando se calienta un alimento a una determinada potencia, dos etapas suceden: una etapa *on* donde la energía microondas es aplicada sobre el alimento a su valor máximo y una etapa *off* donde no hay emisión de MO. A su vez, a medida que la potencia aplicada es menor, el tiempo de duración de la etapa *off* es mayor. El autotransformador elimina la etapa *off*, independientemente de la potencia que se esté utilizando, haciendo que el equipo trabaje realmente a potencia constante. Por otra parte, deja variar en rangos discretos el porcentaje de trabajo de dicha potencia.



**Figura 53-** a) Cinéticas de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC) de arándanos en función del tiempo b) cinéticas de secado microondas de muestras pretratadas osmóticamente, c) cinéticas de secado microondas de muestras pretratadas por aire caliente.



En la Figura 53b-c, podemos apreciar que la menor potencia aplicada sobre los arándanos generó un calentamiento más suave, lo que llevó a una disminución lenta del contenido de agua. Otra de las observaciones durante las experiencias, fueron los tiempos de secado combinado. Ambos procesos fueron afectados por el tiempo que insumió el pretratamiento para alcanzar un determinado WC. La razón que se atribuye es la fuerza impulsora generada por la deshidratación osmótica, la cual es mucho menor para la difusión del agua hacia fuera del fruto con respecto al secado por aire caliente. Para alcanzar el mismo WC, en los pretratamientos DO y SAC llevó un tiempo de 360 min y 90 min respectivamente.

Cuando el secado por MO fue aplicado, una rápida eliminación del contenido de agua se distinguió con respecto al secado control. Beaudry y col. (2004) estudiaron el efecto de métodos combinados en arándanos agrios osmodeshidratados e informaron que cuando el material alcanzó un determinado WC, la velocidad de secado mediante microondas incrementó, generando una importante disminución del contenido de agua comparado con el método de secado por convección.

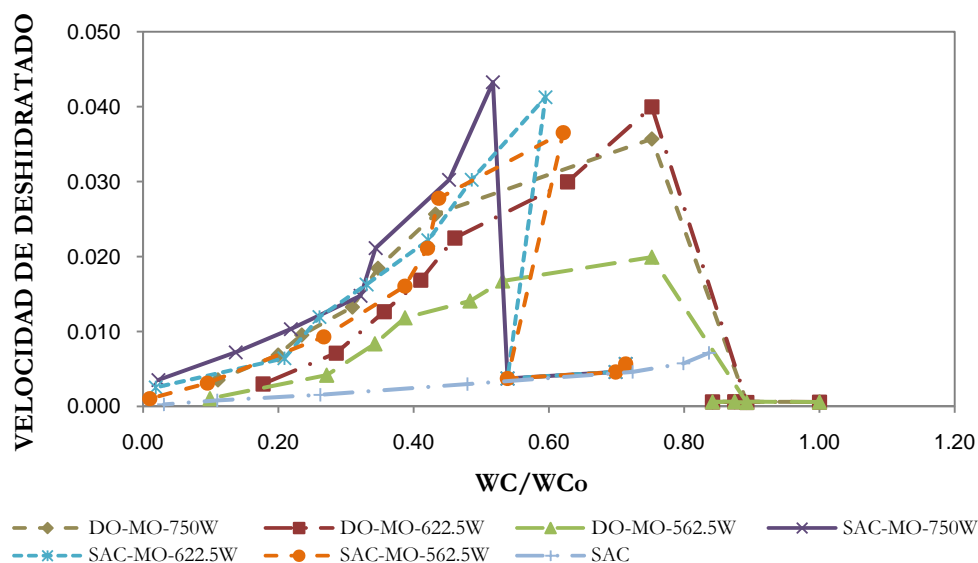
En la sección 1.2. se describió que el secado por aire caliente genera una rápida reducción de la humedad de la superficie provocando un encogimiento de los productos, lo cual resulta en la reducción de la transferencia de agua y la transferencia de calor interno; lo que lleva a presentar ciertas desventajas incluyendo períodos de secado muy largos. No obstante, la energía de microondas puede penetrar a través del material seco hacia el interior causando un calentamiento en las partes húmedas, incrementando así, la velocidad de secado. Además, la presión generada durante el secado, ayuda a crear una estructura porosa reduciendo la resistencia interna de la transferencia de masa y mejora la velocidad de secado respecto al secado con aire caliente a bajos contenido de agua.

La aplicación del MO ha mostrado una reducción significativa del tiempo de secado convectivo de las frutas y vegetales. (Funebo y Ohlsson, 1998; Lin y col., 1998; Maskan, 2000). En el presente estudio, el tiempo medido para el secado por microondas fue alrededor de un 66-73% menor que el correspondiente al tiempo de secado por SAC. Similares resultados fueron obtenidos por Contreras y col. (2008) en la aplicación de microondas en el secado convectivo de manzanas y frutillas.

En cuanto al secado combinado con DO-MO, es claro que el mayor tiempo se produjo durante la DO para alcanzar un determinado WC ya que al aplicar MO la velocidad en la

disminución del contenido de agua incrementó en gran magnitud. Una particularidad observada entre los dos métodos combinados (Figura 53 b-c) fue que al aplicar 562.5W de potencia las muestras pretratadas con DO tardaron más en conseguir el contenido de agua establecido con respecto a las muestras pretratadas con SAC. Esto se atribuye a la incorporación de soluto de la solución en la superficie del fruto, generando la formación de una costra y retardando la difusión del agua hacia el exterior. Además al aplicar la potencia 562.5W, el calentamiento fue más lento lo que llevó a un tiempo de exposición mayor, generando un mayor encogimiento de los mismos.

En la Figura 54 se presentan las curvas de velocidad de secado analizadas durante este trabajo. Puede verse que se han encontrado diferencias en la velocidad de secado entre los distintos métodos estudiados y, en lo que respecta a los secados combinados, entre los procesos utilizados. Esto último es concordante con Therdthai y Zhou (2009), en el secado de hojas de menta.



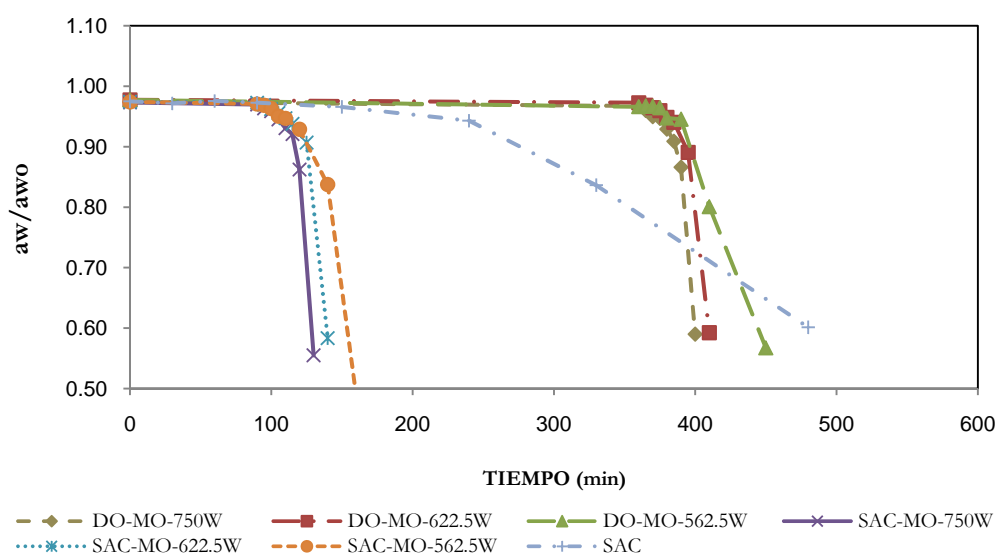
**Figura 54-** Curvas de velocidad de los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC) de arándanos en función del contenido de agua.

En primer lugar, el secado control (SAC) utilizado presentó una alta velocidad al inicio del proceso debido al alto contenido de agua que tenían las muestras. Sin embargo en la mayoría del tiempo, el SAC transcurrió en un período de velocidad decreciente. Esto demostró que la difusión fue el mecanismo físico que gobernó el movimiento de la humedad en las muestras. Resultados coincidentes con Doymaz (2005).

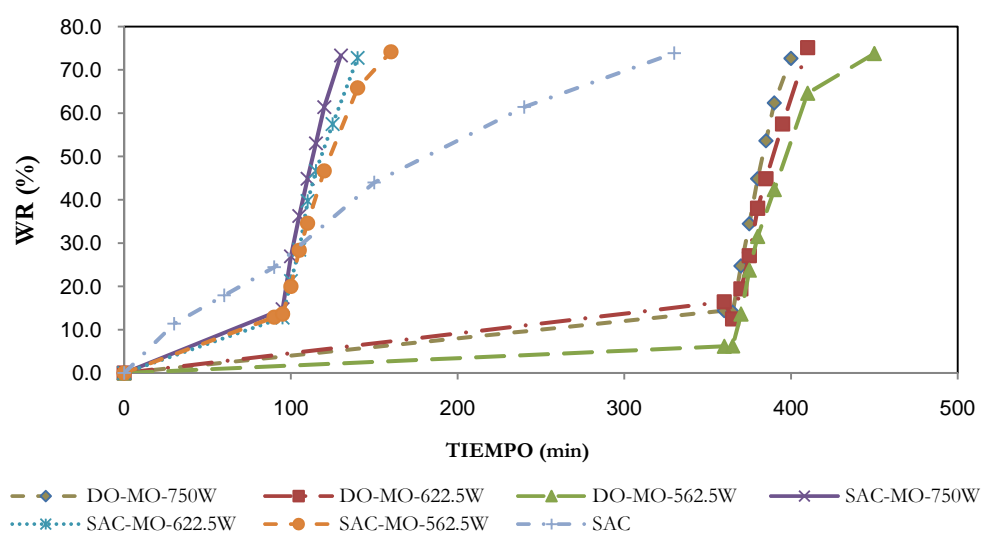
Por otra parte, la velocidad de SAC fue siempre muy inferior con respecto al secado por microondas. Al aplicar microondas en los métodos combinados, se pudo apreciar que al inicio del proceso existió un incremento significativo de la velocidad de secado, comportamiento previamente discutido en la sección 4.2.1.

Comparando los métodos combinados, podemos ver que el SAC-MO presentan mayores velocidades de deshidratado que en DO-MO, tanto en el pretratamiento como en el secado final. La influencia de las etapas iniciales en ambos métodos, es decir SAC y DO, fue mencionada y discutida en detalle en la sección 4.2.6. Con respecto a la etapa final de secado, esta diferencia en el comportamiento se atribuyó a la presencia de azúcar en las muestras pretratadas con DO. A medida que se producía el calentamiento de las frutas, el azúcar se fue caramelizando dificultando la salida del agua desde el interior del fruto, haciendo que el proceso sea más lento.

En lo que respecta a la actividad acuosa ( $a_w$ ) y la pérdida de peso (WR) (Figuras 55 y 56, respectivamente), se comportaron de manera similar como en el secado de frambuesas descrito en la sección 4.2.1. Se observó que a medida que el contenido de agua era reducido, la WR aumentaba y la  $a_w$  disminuía en función del tiempo. En cuanto a la pérdida de peso, todas las muestras tratadas con los métodos combinados presentaron igual WR excepto aquellas muestras secadas con el proceso control.



**Figura 55**-Cinéticas de la actividad acuosa en función del tiempo para los diferentes métodos de secado aplicados en arándanos.



**Figura 56-**Cinéticas de la pérdida de peso en función del tiempo para los diferentes métodos de secado aplicados en arándanos.

#### 4.2.8. Evaluación de las propiedades ópticas

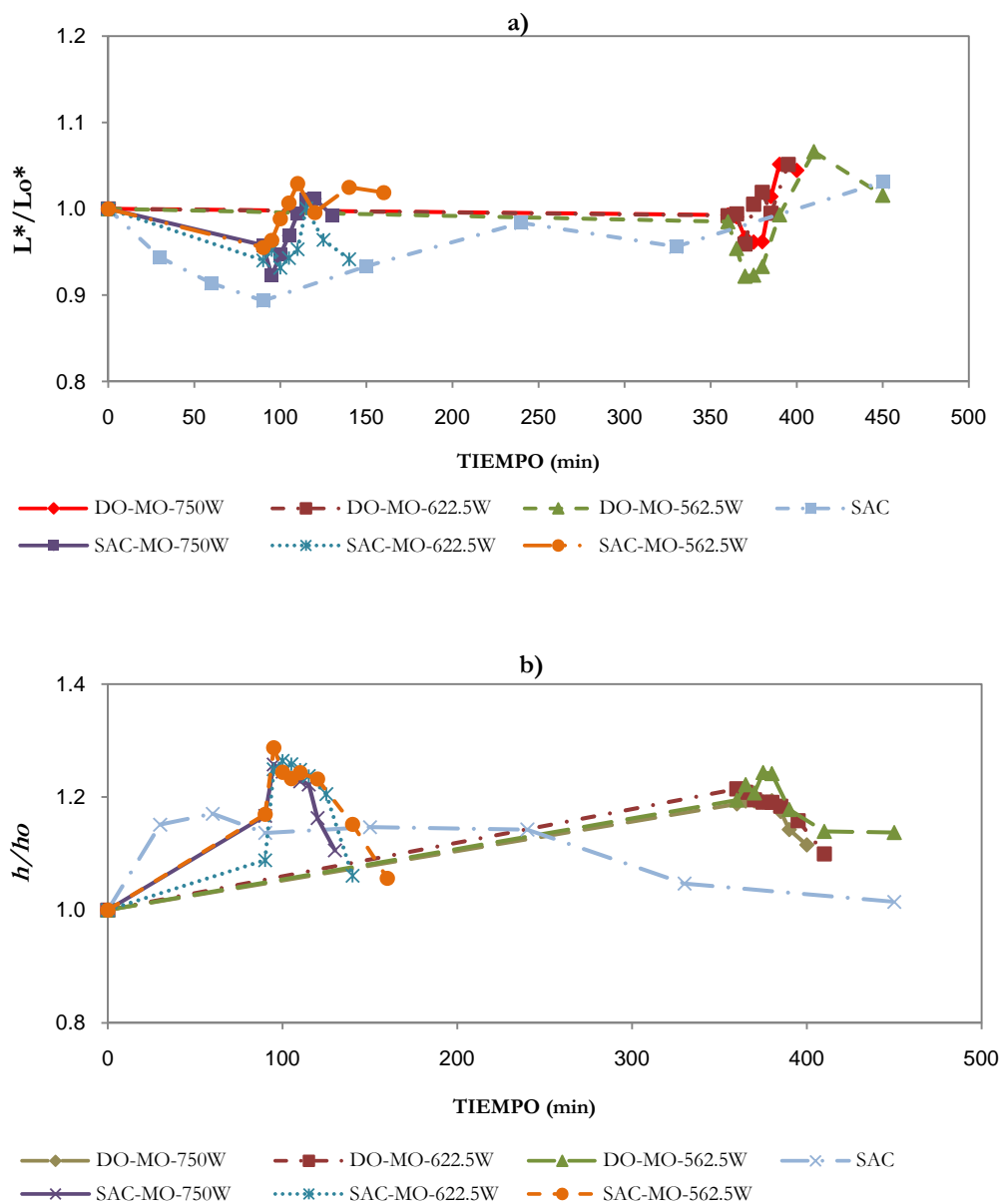
Las tendencias obtenidas de los parámetros de  $L^*/Lo^*$  y  $b/bo$  en función del tiempo para todos los secados realizados, se muestran en las Figuras 57a-b. Cabe aclarar que las frutas, previo a su deshidratado, fueron tratadas con EO-NaOH para favorecer la difusión del agua y el mismo provocó modificaciones en el color como se explicó en los capítulos 2 y 3.

Con respecto al procesamiento por SAC (secado control), el parámetro  $L^*/Lo^*$  expuso una tendencia decreciente hasta los 90 minutos de proceso. Luego de ese período,  $L^*/Lo^*$  comenzó a incrementar a medida que avanzaba el tiempo de secado. El análisis estadístico determinó que el tiempo fue influyente sobre la luminosidad de las muestras. Al analizar las medias se encontró un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) de la luminosidad hacia el final del proceso. Autores como Stojanovic y Silva (2007) reportaron similares resultados en el deshidratado de arándanos. Este incremento significativo puede atribuirse a una mayor concentración del brillo (producto de la aplicación de la solución oleosa (EO)), por la pérdida de volumen como consecuencia de la eliminación del agua.

El parámetro  $bue$  tuvo la misma tendencia pero en sentido inverso y fue menor en comparación a los otros métodos. La disminución de este parámetro indica una menor tonalidad violácea debido a la degradación de los pigmentos antocianinas, los cuales están estrechamente relacionados con el color de los frutos. Una de las causas de este comportamiento es la inestabilidad química de las antocianinas. Su exposición a los tratamientos térmicos puede favorecer su oxidación, resultando en una degradación del color. Sin embargo cuando se analizó estadísticamente, estas modificaciones no fueron significativas ( $p > 0.05$ ). Resultados concordantes fueron encontrados por Yemmireddy y col. (2013) en el secado por aire caliente de arándanos.

En cuanto al método SAC-MO, en la sección 3.2.6 mencionamos que el tratamiento químico realizado sobre la piel de los arándanos generó una disminución del parámetro  $L^*/Lo^*$  e incremento del ángulo  $bue$ , provocando un corrimiento hacia una tonalidad más rojiza pero más oscura y brillante con respecto al material fresco. A su vez, estas alteraciones se mantuvieron constantes durante el SAC. Cuando se aplicó MO, pudo verse con claridad un incremento de  $L^*/Lo^*$  hasta los primeros 20 minutos de secado. Sin embargo, luego de este tiempo, cuando se trabajó con 750W y 622.5W de potencia, este parámetro fue disminuyendo hacia el final del proceso. Por el contrario, cuando se trabajó con la potencia 562.5W este parámetro se mantuvo constante. El análisis estadístico determinó, en todas

las condiciones de trabajo, que a medida que el proceso de secado transcurría  $L^*/L_o^*$  no era afectado de manera significativa ( $p>0.05$ ) con respecto al fresco. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de brillo sobre la superficie de los frutos. Durante las mediciones, la luz disparada por el equipo utilizado pudo ser reflejada de igual forma que la claridad que presentaron los frutos frescos.



**Figura 57-** Evaluación de los parámetros de color durante los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) de arándanos.

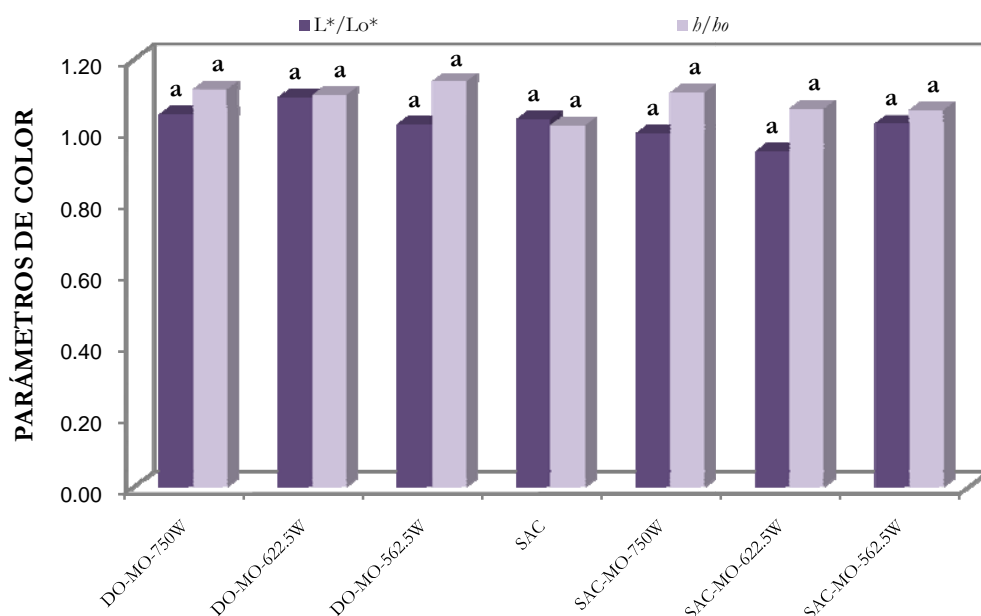
Con respecto al parámetro *bue*, al inicio del proceso hubo un leve incremento de este parámetro pero pasados los 10 minutos marcaron una tendencia decreciente hasta el final, bajo todas la condiciones trabajadas. Ramaswamy y Nsonzi (1998) reportaron que, con el tratamiento térmico, las antocianinas de color rojizo se convierten a una base carbinol incoloro y los restantes copigmentos marrón azulado comienzan a dominar el color de los arándanos secos. Al analizarlo estadísticamente, se mostró que la tonalidad fue afectada significativamente ( $p < 0.05$ ). Sin embargo, cuando se analizaron las muestras se observó que solo se encontraron diferencias significativas con el fresco y al final del proceso. Con respecto al fresco, podemos decir que el pretratamiento químico fue la causa de los cambios en los parámetros, ya que en la sección 3.2.6 se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al fresco pero no con el tratamiento SAC. En cuanto al punto final, la disminución de este parámetro se atribuye al calentamiento generado sobre la superficie de los frutos, provocando una degradación de los pigmentos como mencionaron Ramaswamy y Nsonzi (1998) anteriormente.

En el secado DO-MO, el pretratamiento DO no generó ninguna modificación de la luminosidad, ni del parámetro *bue*. El incremento que se observó fue por causa del pretratamiento químico, ya que durante la DO se mantuvo constante. Cuando se aplicó MO, en todos los casos, el parámetro  $L^*/a^*$  disminuyó hasta los primeros 15 minutos y luego comenzó a incrementarse hasta el final de los procesos. El análisis estadístico determinó que las muestras secadas bajo cualquiera de las condiciones propuestas en este trabajo, no presentaron alteraciones significativas ( $p > 0.05$ ) con respecto a este parámetro. Heredia y col. (2010) observaron que la luminosidad no fue afectada durante el secado combinado de tomate, utilizando los métodos deshidratación osmótica y microondas.

El parámetro *bue* presentó una tendencia inversa al parámetro  $L^*$ . La disminución de la tonalidad indicó una degradación de las antocianinas rojas. Cuando los valores de *bue* fueron analizados estadísticamente, se determinó que el tiempo de secado influyó sobre este parámetro. Al analizar las medias, solo se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con el fresco y el punto final. En cuanto al fresco, ocurre lo mismo que lo explicado en SAC-MO, durante la DO el parámetro *bue* presentó diferencias significativas con respecto al fresco solamente, por el cambio de color generado por la aplicación de EO. Al aplicar MO este parámetro no mostró variación durante la mayoría de su transcurso. Recién llegando al final, las muestras exhibieron una degradación de los pigmentos como consecuencia de la eliminación del agua.

Sin embargo, al final de cada tratamiento los resultados mostraron que los procesos de deshidratado dieron frutos secos con valores de  $L^*$  superiores a los arándanos frescos. Como mencionamos anteriormente, este incremento se atribuye al brillo presente en la superficie de las muestras como consecuencia del tratamiento químico. Por otra parte, el parámetro  $bue$  presentó valores superiores o iguales al fresco. En la determinación de la tonalidad de los frutos, los valores  $bue$  mostraron que los arándanos frescos tienen un tinte color violáceo. Luego del pretratamiento químico, la superficie de los frutos presentó una coloración más rojiza oscura (explicado en la sección 2.2.8). Doymaz y Pala (2002a), estudiaron el efecto del pretratamiento químico sobre la piel de uvas y reportaron similares resultados a los obtenidos en este trabajo.

Cuando se compararon los tratamientos combinados y el secado control, visualmente pudo distinguirse que el tratamiento con EO-NaOH creó una superficie más brillante y azul-rojiza oscura. Luego del deshidratado, el color oscuro permaneció pero con una tendencia más rojiza ( $>$  valores  $bue$ ) y menor intensidad de brillo. En el análisis estadístico no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) entre los mismos (Figura 58). Todos los resultados obtenidos fueron positivos ya que se logró deshidratar los frutos sin llegar a la carbonización de los mismos.



Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada propiedad. Nivel de confianza 95 %.

**Figura 58-** Comparación de los métodos combinados (SA-MO, DO-MO) y secado control (SAC) en la evaluación de los parámetros de color en arándanos al final de los tratamientos.



#### 4.2.9. Evaluación de las propiedades mecánicas

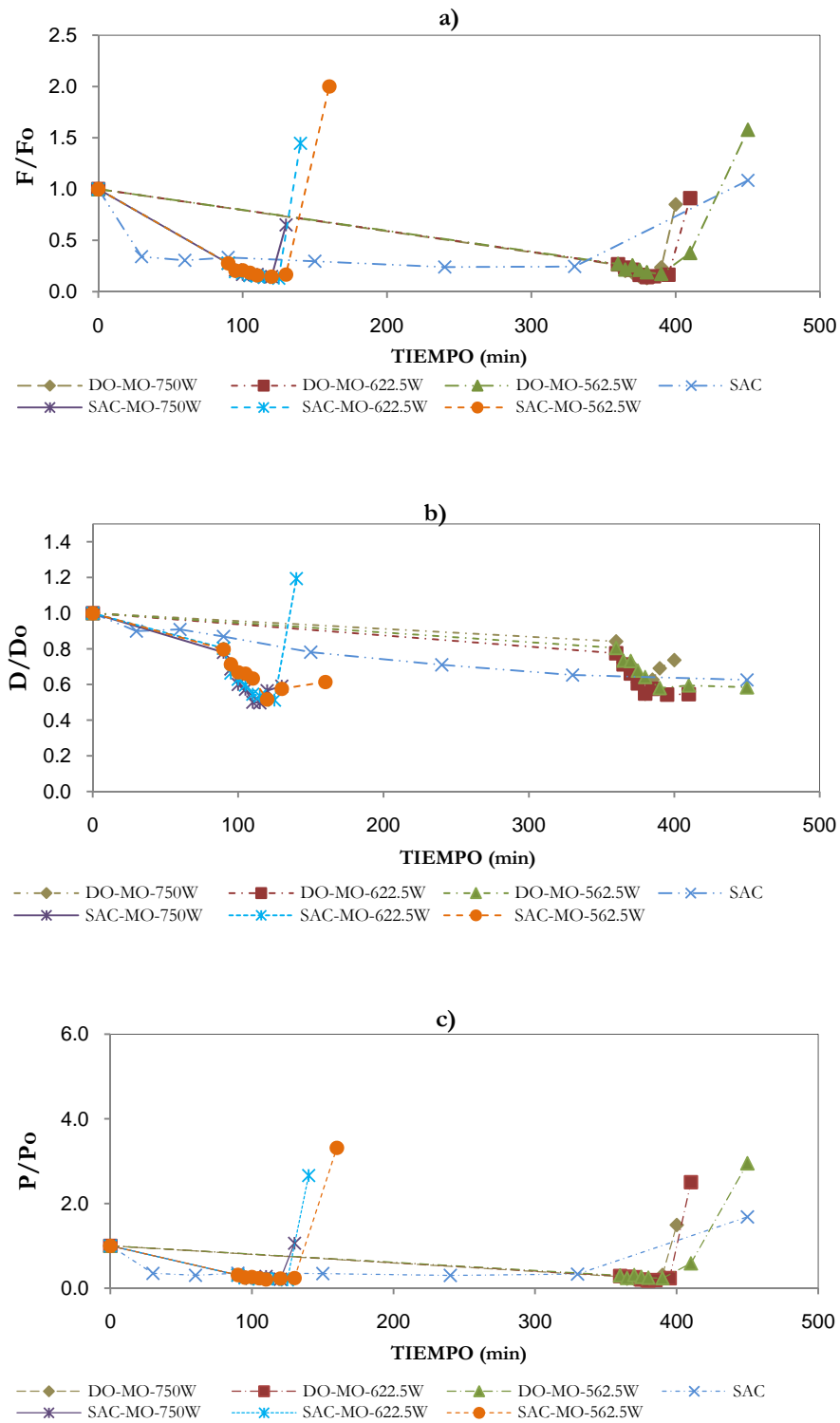
En la Figura 59 se muestra el comportamiento de los parámetros de textura en las muestras sometidas a los diferentes métodos de secado comparados con los valores de las muestras frescas en función del tiempo. Los diferentes comportamientos mecánicos pueden estar relacionados con las diferencias inducidas por la composición de la fase soluble en agua y la matriz celular durante los tratamientos (Contreras y col., 2007).

Durante este trabajo, a medida que el tiempo de proceso avanzaba, se observó una disminución considerable de la firmeza, resistencia a la ruptura y rigidez de las muestras como consecuencia del efecto del calentamiento sobre la matriz celular. Como mencionamos en las secciones 2 y 3.2.3 durante los procesamientos térmicos la reducción de los parámetros mecánicos es debido a un número de cambios físicos y químicos de la estructura de las células y en las propiedades de la pared celular.

Por el contrario, hacia el final de los secados, todas las frutas tratadas presentaron un incremento de la firmeza y rigidez. Este comportamiento está relacionado con la disminución del contenido acuoso, donde se generó un mayor porcentaje de eliminación provocando modificaciones de los componentes solubles en la fase acuosa, otorgándole a las muestras mayor rigidez y firmeza.

Otras de las observaciones durante este análisis, fue que a medida que la potencia de secado fue menor, las muestras mostraban mayor firmeza y rigidez. Esto se debe por el mayor tiempo de exposición de las frutas bajo estas condiciones, lo cual produce una mayor degradación de sus estructuras.

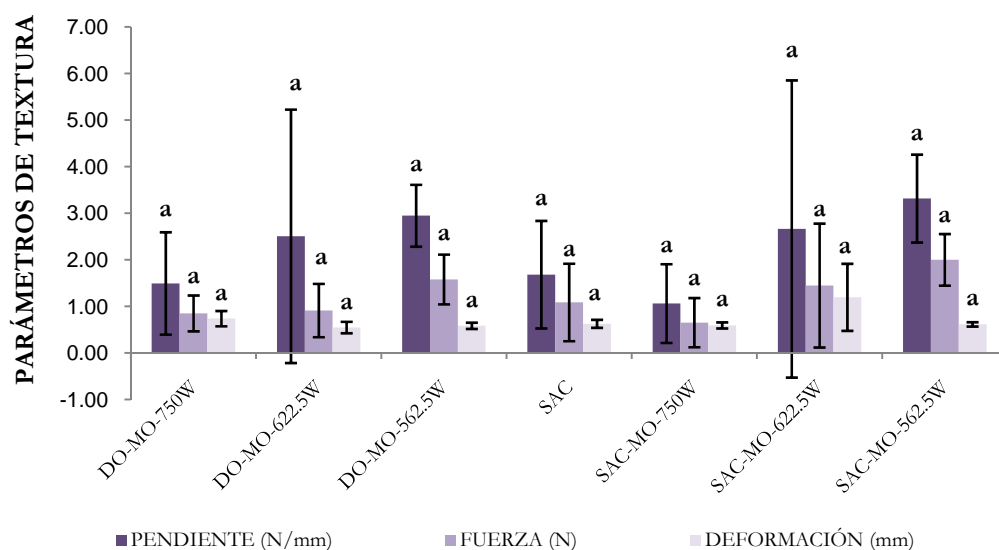
En cuanto a la deformación, las muestras pretratadas por DO tuvieron similares comportamientos durante el transcurso de los procesos de secado. Hacia el final, las muestras mostraban menor deformación en comparación a los frutos frescos, dando indicios de la presencia de estructuras más compactas por el incremento de azúcar en su interior y sobre la superficie. A su vez, esta disminución significó un efecto de endurecimiento, muy común también durante el secado de frutas, que implica la formación de una capa externa muy dura en las frutas deshidratadas. (Contreras y col., 2006).



**Figura 59-** Evolución de los parámetros de textura durante los secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) de arándanos a)  $F/F_0$ : Firmeza, b)  $D/D_0$ : Deformación y c)  $P/P_0$ : Rigidez.

Las muestras tratadas por SAC y SAC-MO también presentaron deformaciones similares a las muestras tratadas con DO-MO, excepto en aquellas procesadas por SAC-MO622.5W. En el caso de las muestras tratadas con SAC, la eliminación del agua genera un encogimiento muy importante en los frutos, produciendo estructuras de poros pequeños lo cuales le otorga mayor firmeza, rigidez y menor deformación. En el caso de las muestras procesadas por SAC-MO622.5W, el mayor nivel de deformación tiene que ver con la presencia de estructuras más porosas. Contreras y col., 2006, reportaron que en productos porosos y quebradizos, las curvas muestran un valor máximo de fuerza a altos niveles de deformación.

Al comparar las propiedades mecánicas (Figura 60) de los frutos procesados bajo los distintos métodos de secado, estadísticamente no se encontraron diferencias significativas ( $p>0.05$ ). Si bien se tomó un número razonable de muestras (12 frutas para cada replicado) para la determinación de las propiedades mecánicas, el secado de frutos no fue totalmente uniforme y se encontraron grandes dispersiones entre los diferentes triplicado de cada uno de los métodos analizados.



Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada propiedad. Nivel de confianza 95 %.

**Figura 60-** Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) en la evaluación de los parámetros de textura en arándanos al final de los tratamientos.

4.2.10. Evaluación de la capacidad antioxidante

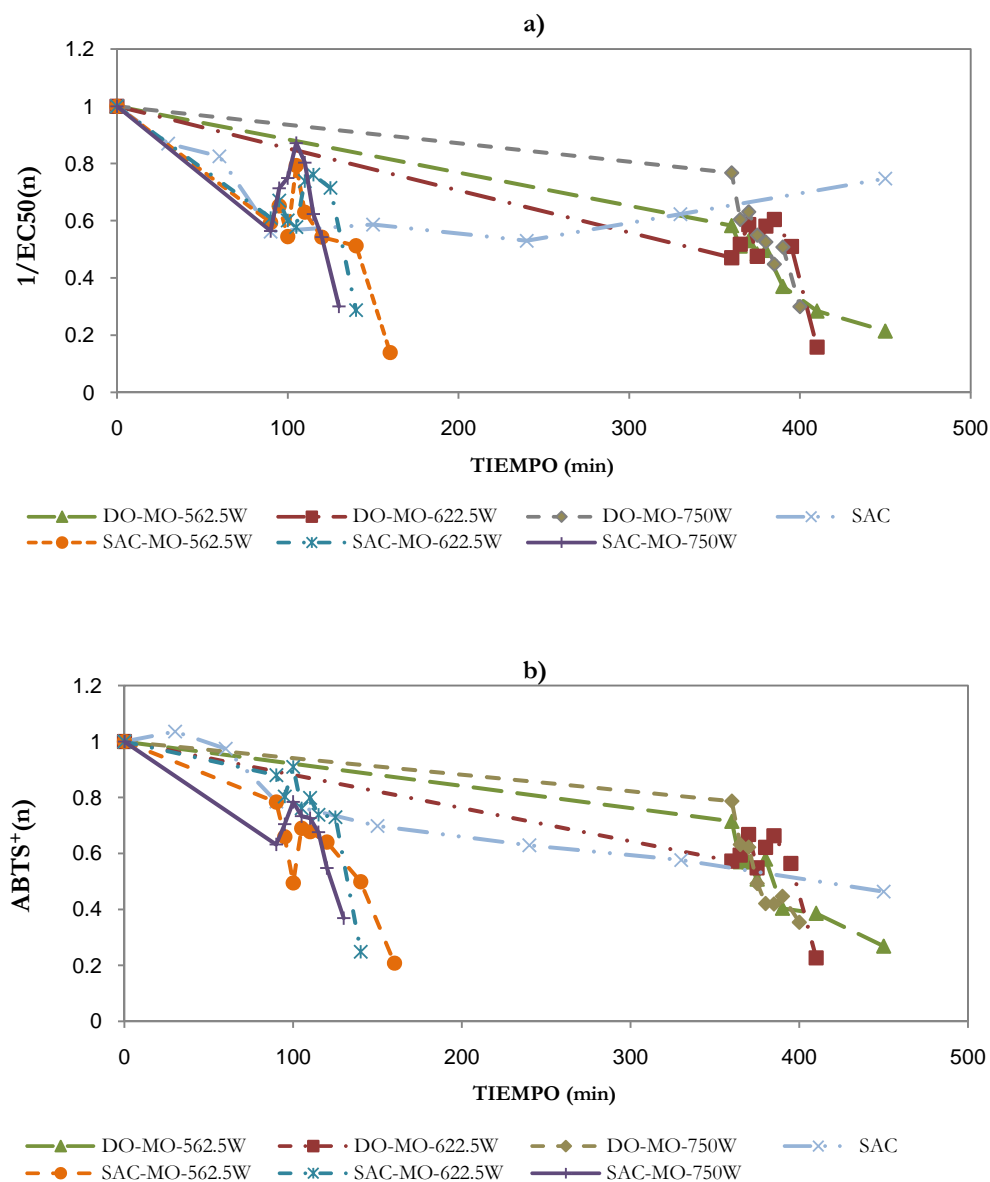
En la Figura 61, se muestran las curvas correspondientes a la capacidad antioxidante en términos de  $1/EC50(n)$  y  $ABTS^+(n)$  en función del tiempo y se observa que ambos métodos presentaron similares tendencias. Resultados equivalentes fueron obtenidos por Suvarnakuta y col. (2011) en el secado de mangostán.

Durante el secado control podemos ver una clara disminución de la capacidad antioxidante (CA) a medida que el tiempo de secado transcurre, pero ambos métodos presentan diferentes tendencias. El método DPPH muestra una tendencia creciente a partir de los 240 minutos hasta el final del procesamiento, mientras que en  $ABTS^+$  la tendencia siempre es decreciente. En ambos métodos se utilizaron los mismos extractos antioxidantes de las muestras. Sin embargo, como mencionamos en la sección 4.2.4, el método DPPH al llevar más tiempo de reacción en comparación al  $ABTS^+$  puede ser lógico que presente diferentes resultados en la actividad antioxidante. En DPPH la capacidad de inhibición registrada fue de un 70 % mientras que en  $ABTS^+$  fue mayor al 40%.

En los secados combinados, ambos pretratamientos (DO y SAC) generaron similar degradación de los componentes antioxidantes bajo las condiciones seleccionadas. Al aplicar MO, las cinéticas de la capacidad antioxidante en todas las muestras fueron similares, independientemente del pretratamiento y condición de MO utilizada. A su vez, presentaron un comportamiento equivalente al obtenido en frambuesas: la primera etapa tuvo una tendencia creciente hasta alcanzar un determinado tiempo y luego comienza a disminuir hasta el final del proceso.

Hacia el final de los secados combinados, las muestras presentaron entre un 20-30% de inhibición radicalaria. El mayor porcentaje se obtuvo cuando las muestras fueron tratadas con 750W de potencia. Este fenómeno se debe a que las muestras bajo esta condición tuvieron menor tiempo de exposición, originando una menor degradación de los componentes antioxidantes. Similares tendencias fueron encontradas por algunos autores (Ghanema y col., 2012) quienes reportaron que los componentes fenólicos, compuestos altamente relacionados con la actividad antioxidante, no fueron afectados significativamente con el incremento de la potencia de microondas. El secado por microondas a altos niveles y durante cortos tiempos preservó el contenido máximo total de fenoles.

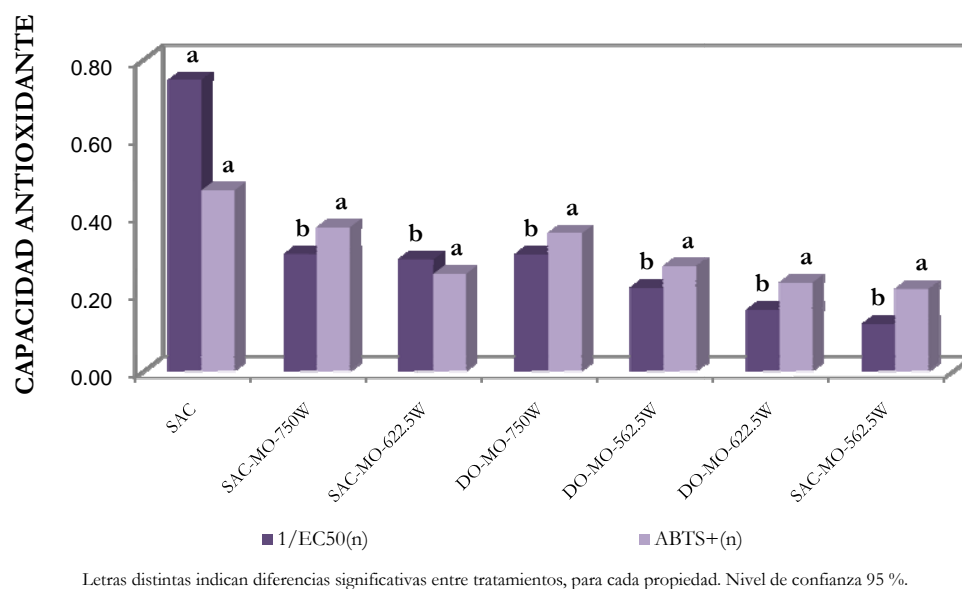
Por otra parte, Garau y col. (2007), reportaron que largos tiempos asociados a bajas temperaturas de proceso pueden promover un decrecimiento de la actividad antioxidante. En este estudio si bien se trabajó con distintos niveles de potencia, puede verse claramente que a menor potencia llevó más tiempo de proceso y por ende, generó mayor degradación de la actividad antioxidante.



**Figura 61-** Comportamiento de la capacidad antioxidante de arándanos durante los diferentes secados combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC).

En cuanto a la comparación de los diferentes métodos de secado (Figura 62), el método por ABTS<sup>+</sup> no presentó diferencias significativas ( $p>0.05$ ). Por el contrario, en el método DPPH si se encontraron diferencias ( $p<0.05$ ), aunque solo se encontraron diferencias con respecto al control.

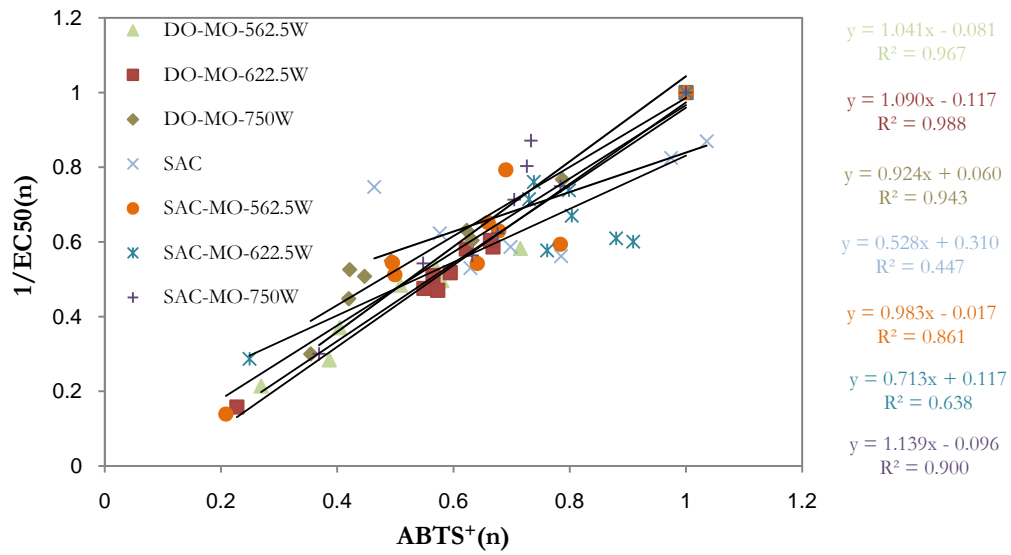
En la mayoría de los casos, el método ABTS<sup>+</sup> presentó mayor porcentaje de inhibición que en el DPPH. Similares tendencias fueron encontradas por Suvarnakuta y col. (2011). Este fenómeno podría ser debido a la accesibilidad estérica de los radicales DPPH. Los sitios activos de los radicales DPPH se encuentran en el medio de la estructura, por lo tanto a los antioxidantes podría serle dificultoso acceder a los sitios radicales DPPH (Prior y col., 2005), aún más cuando la capacidad inhibitoria de los arándanos secos fue menor con respecto a los frescos.



**Figura 62-** Comparación de los métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y secado control (SAC) en la evaluación de la capacidad de antioxidantes en arándanos al final de los tratamientos.

Analizando la existencia de correlación entre los métodos de medición de la capacidad antioxidante (Figura 63), nos encontramos que solo el secado control y el secado por SAC-MO-622.5W no tuvieron una buena correlación ( $R^2=0.4-0.6$ ), el resto de los procesos presentaron una relación mayor a  $R^2=0.9$  al igual que se mostró en frambuesas en la sección 4.2.4. La falta de correlación entre las muestras tratadas por SAC y SAC-MO-622.5W indicó que los extractos de frutas no tuvieron una actividad comparable entre ambos métodos. El motivo que podría haber generado estos resultados, es que la

conservación de las muestras no haya sido lo suficientemente buena e implicó la pérdida de ciertos componentes entre el tiempo de medición de un método con otro.

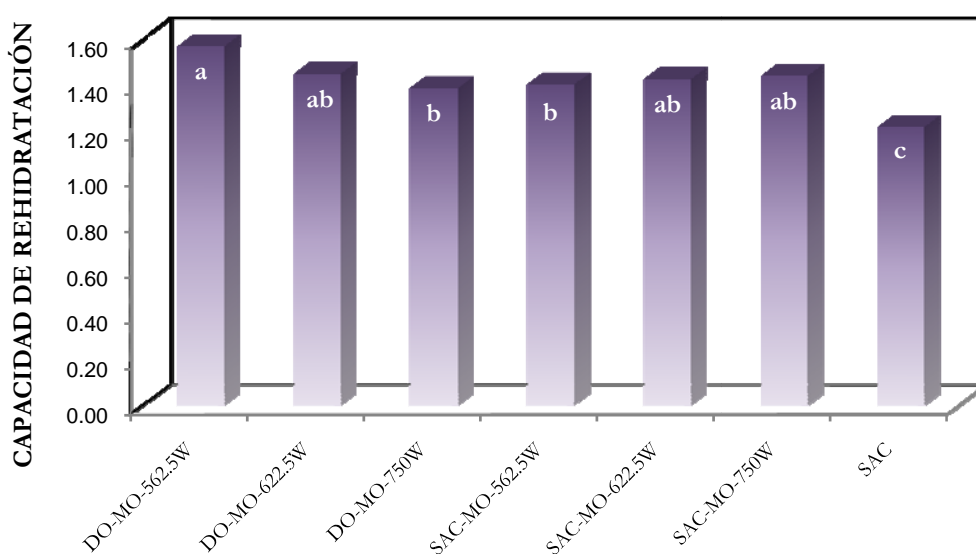


**Figura 63-**Relación entre los dos métodos utilizados para el análisis de antioxidantes de arándanos secos.

## 4.2.11. Evaluación de la capacidad de rehidratación

La rehidratación es un fenómeno complejo afectado por numerosos factores, tal como la porosidad de los productos finales, las condiciones de proceso, entre otros.

En todo el rango de los experimentos analizados, la capacidad de rehidratación fue afectada por las condiciones de proceso aplicadas sobre los arándanos (Figura 64). Los frutos presentaron una baja rehidratación luego de dos horas, alcanzando un contenido de agua del 35-37% (bh). También se realizó una prueba preliminar con DO-MO a 562.5W durante 16 horas (fueron las muestras que obtuvieron mayor capacidad de rehidratación) y la misma casi no se modificó. Esto demostró que todos los frutos presentaron un colapso en su estructura dejando pequeños espacios intercelulares, lo que llevó a una baja absorción de agua. Por otra parte, hay que tener en cuenta que estos frutos poseen piel con poros muy pequeños y a la temperatura alcanzada en los frutos se genera la caramelización de los azúcares sobre la superficie, ya sea los que fueron incorporados por la DO y los propios del fruto, generando la obstrucción de los mismos. Esto condujo a una disminución de la difusión del agua a través de la superficie durante la rehidratación.



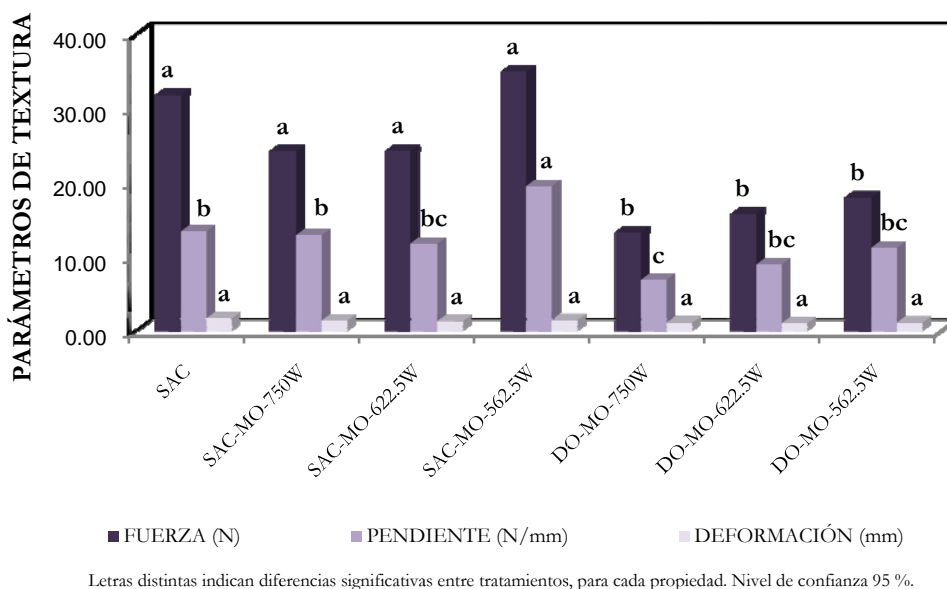
Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada propiedad. Nivel de confianza 95 %.

**Figura 64-** Capacidad de rehidratación de los arándanos bajo los diferentes métodos combinados (SAC-MO, DO-MO) y el secado control (SAC).



Yang y Atallah (1985) informaron al comparar diferentes métodos de secado en arándanos que la menor relación de rehidratación fue obtenida mediante el método combinado por aire caliente-microondas y que la baja relación de rehidratación es debida al daño térmico. Haas y col. (1974) reportaron que la menor rehidratación para vegetales secos fue correlacionada con el mayor daño en los tejidos durante el secado. Podemos decir entonces, que estos productos se adaptan mejor para consumo directo sin rehidratación. Al compararse con el secado por aire caliente, se observó que las muestras obtenidas por el secado MO presentaron una mayor rehidratación. La capacidad de rehidratación incrementó en un 20% comparada con las muestras sometidas a SAC, lo cual significa que secar las muestras por microondas genera menor daño.

Con respecto a los parámetros de textura (Figura 65) se observó que todas presentaron igual deformación (resistencia a la ruptura). Sin embargo cuando se compararon los demás parámetros (firmeza y rigidez) la influencia del SAC en las muestras rehidratadas, tanto como secado único y como pretratamiento, generó una mayor firmeza en las muestras que las pretratadas por DO. En cuanto a la rigidez solo las muestras tratadas por SAC-MO 562.5W fueron más rígidas, lo cual coincide que el daño en los tejidos no solo se genera durante el pretratamiento sino que también por el mayor tiempo de exposición durante el secado por MO.



**Figura 65-** Evaluación de los parámetros de textura en arándanos rehidratados.

4.2.12. Evolución de las muestras desde el fresco hasta la rehidratación

A continuación, en las Figuras 66, 67 y 68 se presentan fotografías de los arándanos en las diferentes etapas de proceso. En todas las secuencias de fotos, podemos observar como el pretratamiento químico aplicado sobre la piel modificó el color de los frutos y se mantuvo inalterado a lo largo de los procesamientos. Por otro lado, los frutos al tener una baja capacidad de rehidratación no lograron alcanzar las características similares al fresco como ocurrió en frambuesas, siendo las muestras procesadas por SAC las que presentaron mayores modificaciones en su estructura lo que provocó la menor absorción de agua.

a)



b)



c)



**Figura 66-** Evolución de las muestras: a) Frescas, b) Secado control (SAC) y c) Rehidratadas.

a)



b)



c)



d)



**Figura 67-** Evolución de las muestras: a) Frescas, b) Pretratadas con SAC, c) Secadas con microondas con potencia 750W y d) Rehidratadas.

a)



b)



c)



d)



**Figura 68-** Evolución de las muestras: a) Frescas, b) Pretratadas con DO, c) Secadas con microondas con potencia 750W y d) Rehidratadas.

### 4.3. CONCLUSIONES

#### FRAMBUESAS

- El análisis del secado por microondas de frambuesas mostró que las potencias extremas no eran condiciones ideales. Al aplicar 500W, se obtuvo una gran pérdida en la integridad de las frutas y aquellas que todavía mantenían su estructura presentaban alto contenido acuoso. Cuando se analizó la aplicación de la potencia más baja (160W), la misma presentó un mínimo efecto sobre la reducción de la humedad lo cual se concluyó que no sería una condición factible en la industria alimentaria por los altos costos que generaría. Sólo la potencia de 350W fue la que permitió lograr un alto rendimiento de frutas secas con su estructura íntegra. Con respecto al tiempo de proceso, la duración de los pretratamientos fue lo que afectó a esta variable en el secado combinado ya que las muestras cuando fueron sometidas al secado por microondas presentaron igual comportamiento. La pérdida de peso y actividad acuosa presentaron una relación estrecha con la disminución del contenido de agua.
- En cuanto a la velocidad de secado, fue evidente que el comportamiento de las cinéticas es dependiente de los métodos de secado utilizados. Durante todo el transcurso de los procesos, la velocidad de deshidratado tuvo un comportamiento decreciente. Esto se debe a que la transferencia de masa fue gobernada por las propiedades intrínsecas de las muestras. A su vez, se pudo observar un claro incremento de este parámetro cuando se aplicó microondas en comparación a los pretratamientos, indicando que el secado por microondas sería una buena alternativa para deshidratar fruto, en poco tiempo.
- Por otro lado, la alta velocidad observada al inicio del tratamiento se generó por la mayor absorción de energía de microondas como consecuencia del alto contenido acuoso que presentaban las muestras.
- Con respecto a las propiedades ópticas de las frambuesas, en el secado control la luminosidad se mantuvo constante y la tonalidad mostró variación con respecto al fresco pero no de forma significativa. Visualmente pudo observarse una leve coloración amarronadas como consecuencia de las reacciones de pardeamiento que se generaron durante el calentamiento de la superficie de los frutos.
- En el secado por aire caliente-microondas, previo al secado por microondas los frutos ya presentaban una decoloración de su superficie generada por el pretratamiento de aire caliente. Durante el secado final, tanto la luminosidad como el parámetro *bue*

presentaron variación con respecto al fresco, pero estos cambios no fueron significativos. Visualmente, las muestras tenían un color rosado claro en su superficie, sin presentar zonas con coloración amarronada, por lo que podemos concluir que la eliminación del agua en la superficie de los frutos a una temperatura de 60 °C al inicio del secado nos permitió mantener o proteger los pigmentos de los frutos sin generarse reacciones de pardeamiento.

- En cuanto al secado combinado por deshidratación osmótica-microondas, las muestras previo al secado por microondas ya presentaban un color rojo intenso y brillante por la presencia de azúcar remanente en la superficie del fruto. Al aplicar microondas, la luminosidad incrementó de manera significativa por la concentración de brillo y la tonalidad no varió significativamente. Sin embargo, visualmente pudo determinarse que los frutos tenían un color oscuro como consecuencia de la reacción de caramelización del azúcar pero manteniendo la tonalidad rojiza.
- En todos los casos, las muestras presentaron un incremento en su tonalidad al final del proceso, esto coincide con el mayor porcentaje de eliminación del agua que se produjo durante el secado, por lo cual podemos decir que hubo una concentración de los pigmentos. Entre los distintos métodos analizados no hubo diferencias significativas con respecto a la tonalidad, si lo hubo con la luminosidad. Las muestras pretratadas por deshidratación osmótica presentaron mayor luminosidad por la presencia de brillo en la superficie.
- En el análisis de los parámetros de textura, los pretratamientos tuvieron influencia sobre los frutos, otorgándoles menor firmeza y rigidez y por consiguiente, menor resistencia a la ruptura. Al aplicar el secado por microondas, en todos los casos se observaron iguales comportamientos: presentan un incremento considerable de la rigidez y firmeza hacia el final del proceso como consecuencia de la eliminación del agua en el interior del fruto. Observando los diferentes métodos, los procesos combinados generaron estructuras más firmes y rígidas.
- En las frutas pretratadas por deshidratación osmótica, estas características se debieron a la caramelización de los azúcares incorporados durante este proceso.
- En los frutos pretratados con aire caliente, la mayor firmeza y rigidez se produjo por la generación de espacios intercelulares más pequeños con respecto a las muestras tratadas con microondas.
- En el secado control, la menor firmeza y rigidez se atribuyó a la generación de una estructura porosa, durante el secado por microondas, como consecuencia de la rápida

evaporación de agua lo que llevó a que sean menos firmes frente a una determinada fuerza.

- Con respecto a la deformación, las muestras pretratadas por deshidratación osmótica presentaron mayor nivel de este parámetro y las muestras tratadas por secado control tuvieron el menor nivel. Esto indicó la presencia de diferentes estructuras, según el método utilizado, desde más compactas a porosas.
- En el análisis de la capacidad antioxidante todos los tratamientos provocaron una disminución de la actividad antioxidante con respecto al valor inicial. Tanto en el secado control (solo microondas) como en el secado aire caliente-microondas se distinguió una considerable reducción de la capacidad antioxidante durante el tiempo de proceso. A su vez, las muestras secadas por aire caliente-microondas ya presentaban una mayor degradación de los componentes antioxidantes por la susceptibilidad a la oxidación con el aire caliente debido a la presencia de calor y oxígeno.
- El pretratamiento de deshidratación osmótica redujo la actividad antioxidante en un 30-40% por el intercambio de sustancias durante el proceso. Si bien se generó una disminución de los componentes antioxidantes en el método deshidratación osmótica-microondas, este método permitió obtener una mayor retención de la actividad antioxidante en comparación a los demás métodos aplicados. La razón que se atribuyó es por la sacarosa infundida dentro y sobre la superficie de las muestras osmodeshidratadas, actuando como un agente protector en contra de la degradación térmica de los componentes antioxidantes.
- En cuanto a la comparación de los diferentes métodos de secado, el método por ABTS<sup>+</sup> no presentó diferencias significativas, por el contrario, en el método DPPH si se encontraron diferencias, concluyendo que en el método DPPH los componentes antioxidantes interactúan en mayor proporción con dicho reactivo. Aun así, se obtuvieron similares tendencias en ambos métodos y presentaron correlación significativa ( $R= 0.75-0.95$ ), indicando que los extractos de frutas muestran actividad comparable en ambos métodos.
- En la evaluación de la capacidad de rehidratación, el secado por microondas permitió mantener la estructura de los frutos casi inalterada logrando alcanzar un 90% de rehidratación en las muestras secas con respecto al contenido de agua del material fresco. Por otro lado, las muestras pretratadas por osmodeshidratación tuvieron menor capacidad de rehidratación por la obstrucción de los poros intercelulares con el azúcar



incorporado. Estadísticamente no se observaron diferencias significativas entre las muestras rehidratadas, Además fue posible observar que el comportamiento mecánico de las muestras rehidratadas fue muy diferente al comportamiento mecánico de las muestras frescas, debido a la generación de cierto daño en la matriz celular durante el secado y esto hizo que no sea posible que después de la rehidratación se recuperen las características iniciales de las muestras.

#### ARÁNDANOS

- En el secado combinado de arándanos, la menor potencia aplicada sobre los arándanos generó un calentamiento más suave. Por otra parte, al igual que en frambuesas, los tiempos de secado combinados fueron afectados por el tiempo que insumió el pretratamiento para alcanzar un determinado WC, como consecuencia de la diferencia entre las fuerzas impulsoras generadas por ambos pretratamientos. Cuando el secado por microondas fue aplicado, una rápida eliminación del contenido de agua se distinguió con respecto al secado control reduciendo el tiempo en un 66-73%.
- Una particularidad observada entre los dos métodos combinados, fue que al aplicar la menor potencia las muestras pretratadas con deshidratación osmótica tardaron más en conseguir el contenido de agua establecido. Esto se atribuyó a la incorporación de soluto de la solución en la superficie del fruto, generando la formación de una costra y retardando la difusión del agua hacia el exterior.
- En las curvas de velocidad de secado, en el secado control se observó una alta velocidad al inicio del proceso debido al alto contenido de agua que tenían las muestras. Sin embargo, transcurrió, en su mayoría, en un período de velocidad decreciente. A su vez, la velocidad del secado por aire caliente fue siempre inferior con respecto al secado por microondas. Al aplicar microondas en los métodos combinados, hubo un incremento significativo de la velocidad de secado. Todos los tratamientos, ya sea pretratamiento como el secado final, presentaron un período de velocidad decreciente a medida el contenido acuoso de las muestras era menor. A su vez, el método secado aire caliente-microondas presentaron mayor velocidad con respecto a las muestras tratadas por deshidratación osmótica-microondas, como consecuencia de la presencia de azúcar la cual genera un obstáculo para la difusión del agua hacia el exterior de los frutos.
- En lo que respecta a la actividad acuosa y la pérdida de peso, se comportaron de manera similar como en el secado de frambuesas.



- En la evaluación de las propiedades ópticas, las muestras expuestas en todas las condiciones ya presentaban modificaciones en su superficie como consecuencia de la aplicación del pretratamiento químico sobre la piel de los frutos, presentando una tonalidad azul-rojiza oscura y brillante.
- Al aplicar el secado por aire caliente, la luminosidad tuvo una tendencia decreciente al inicio y luego fue creciente hasta el final, por concentración del brillo debido a la disminución del volumen de las frutas. El parámetro *bue*, tuvo la misma tendencia pero en sentido inverso, indicando la presencia de una tonalidad más azulada por degradación de los pigmentos antocianinas debido a su exposición a los tratamientos térmicos. Sin embargo, estas modificaciones no fueron significativas.
- En cuanto al método por secado por aire caliente-microondas, durante el secado por microondas la luminosidad presentó una tendencia inversa al secado control cuando los frutos fueron tratados con 750W y 622.5W. Con el menor porcentaje se mantuvo constante. El análisis estadístico determinó que la luminosidad no fue afectada de manera significativa con respecto al fresco. La presencia de brillo generó que la luz disparada por el equipo utilizado, haya reflejado de igual forma que la claridad presentada por los frutos frescos. Con respecto al parámetro *bue*, al inicio del proceso hubo un leve incremento pero pasados los 10 minutos marcaron una tendencia decreciente hasta el final. Estadísticamente estas modificaciones fueron significativas con respecto al fresco y hacia el final del proceso. Con respecto al fresco, el pretratamiento químico fue la causa de los cambios de este parámetro. En cuanto al punto final, la disminución se atribuyó a la degradación de los pigmentos.
- En el secado deshidratación osmótica-microondas, cuando se aplicó microondas, la luminosidad disminuyó hasta los 15 minutos y luego comenzó a incrementar hasta el final. En el parámetro *bue*, la tendencia fue inversa. Estadísticamente no hubo efecto significativo sobre la luminosidad pero si en el parámetro *bue*, de igual manera que en el método combinado aire caliente-microondas.
- Al final de cada tratamiento los resultados mostraron que los procesos de deshidratado dieron frutos secos con valores de  $L^*$  y *bue* superiores a los arándanos frescos. Cuando se compararon los tratamientos estadísticamente, no se encontraron diferencias. Visualmente el tratamiento con oleato de etilo con hidróxido de sodio creó una superficie brillante y azul-rojiza oscura. Luego del deshidratado, el color oscuro permaneció pero más rojizo y con menor intensidad de brillo. Aun así, los resultados obtenidos fueron positivos ya que se logró deshidratar los frutos sin llegar a la carbonización de los mismos.

- Según el análisis de los parámetros de textura los procesamientos generaron una disminución considerable de la firmeza, resistencia a la ruptura y rigidez como consecuencia del efecto del calentamiento sobre la matriz celular, provocando numerosos cambios físicos y químicos de la estructura de las células y en las propiedades de la pared celular. Hacia el final de los procesos, al lograrse un mayor porcentaje de eliminación de agua provocó modificaciones en el contenido de componentes solubles en la fase acuosa, obteniendo muestras con mayor rigidez y firmeza.
- En cuanto a la deformación, las muestras pretratadas con deshidratación osmótica presentaron similares comportamientos indicando la presencia de estructuras compactas debido a la presencia de azúcar tanto en la superficie como en el interior de los frutos. A su vez, el calentamiento de las muestras generó un endurecimiento por la formación de una costra externa. Los frutos secados y pretratados con aire caliente presentaron similar comportamiento que las pretratadas con DO. La razón que se atribuyó en estas muestras, es el rápido encogimiento de los frutos generado por el secado de aire caliente, formando estructuras de poros pequeños lo cual le otorga firmeza y rigidez.
- Al analizar estadísticamente las muestras hacia el final de los tratamientos, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) por la dispersión obtenida entre las medidas de cada triplicado en cada uno de los métodos de secado. Esto indicó que el mismo no fue uniforme para todas las muestras.
- En la evaluación de la capacidad antioxidante, durante el secado control podemos ver una clara disminución de la capacidad antioxidante a medida que el tiempo de secado transcurre. Sin embargo en ambos métodos hubo distintas tendencias. El método DPPH muestra una tendencia creciente a partir de los 240 minutos hasta el final del procesamiento, mientras que en ABTS<sup>+</sup> la tendencia siempre es decreciente. Estas diferencias se deben a las mencionadas anteriormente en el análisis de la capacidad antioxidante de frambuesas. En DPPH la capacidad de inhibición registrada fue de un 70 % mientras que en ABTS<sup>+</sup> fue mayor al 40%.
- En los secados combinados, ambos pretratamientos generaron similar degradación de los componentes antioxidantes. Al aplicar microondas, las cinéticas de inhibición radicalaria fueron similares, independientemente de las condiciones utilizadas. A su vez, presentaron un comportamiento equivalente al obtenido en frambuesas. Hacia el final de los métodos de secado combinado, las muestras presentaron entre un 20-30% de inhibición radicalaria. El mayor porcentaje se obtuvo cuando las muestras fueron

tratadas con 750W de potencia, la cual permitió secar las muestras en menor tiempo evitando una mayor degradación de los componentes antioxidantes.

- En cuanto a la comparación de los diferentes métodos de secado, el método por ABTS<sup>+</sup> no presentó diferencias significativas, si las hubo en el método DPPH aunque solo con respecto al control.
- Por otra parte, el método ABTS<sup>+</sup> presentó mayor porcentaje de inhibición que en DPPH. Este fenómeno se debió a la accesibilidad estérica de los radicales DPPH y a la baja capacidad inhibitoria de los frutos secos. En el análisis de las correlaciones entre ambos métodos, solo el secado control y el secado por aire caliente-microondas 622.5W no tuvieron una buena correlación ( $R=0.4-0.6$ ). La falta de correlación se debió aparentemente a una conservación insuficientemente de las muestras, provocando la pérdida de ciertos componentes entre el tiempo de medición de un método con otro.
- La capacidad de rehidratación de los arándanos fue mucho menor comparada con las frambuesas. Una de las razones principales fue la presencia de la piel que poseen los arándanos, la cual tiene poros muy pequeños con respecto a los frutos sin piel. Cuando los frutos fueron sometidos a las distintas formas de secado, la temperatura alcanzada generó la caramelización de los azúcares, ya sea propios como los incorporados durante la deshidratación osmótica, obstruyendo la difusión del agua hacia el interior de los mismos. Por otro lado, el secado por microondas permitió una mayor capacidad de rehidratación que en los frutos secados por aire caliente.
- Con respecto a las propiedades mecánicas, nunca se alcanzaron las obtenidas por los frutos frescos, como consecuencia de los daños generados durante los procesos. Aquellas muestras que fueron tratadas por aire caliente y aire caliente-microondas presentaron una mayor firmeza y rigidez en comparación a las muestras pretratadas por deshidratación osmótica.

*5. ALMACENAMIENTO  
DE  
ARÁNDANOS SECOS*

## 5. ALMACENAMIENTO DE ARÁNDANOS SECOS

Las frutas secas son definidas como productos estables frente a las condiciones ambientales debido a los bajos niveles de actividad acuosa obtenidos durante su procesamiento. La calidad en los frutos secos y sus derivados incluye atributos que están relacionados con el sabor, flavor, textura, color y vida útil (Perera, 2005). La estabilidad de estos componentes depende sobre todo del método de secado, material del envase y condiciones de almacenamiento.

A pesar de los avances tecnológicos para el mantenimiento de la calidad y prolongación de la vida útil de los productos procesados, el factor limitante para la calidad óptima es el papel de los microorganismos en la alteración y seguridad de los mismos. Es frecuente que los frutos secos se encuentren almacenados a temperatura ambiente o estén expuestos en los mercados a la vista de los consumidores. Como consecuencia de esto, ciertos problemas pueden originarse durante el almacenamiento tales como la infestación por plagas o crecimiento microbiano y consecuente formación de micotoxinas u otros productos de metabolismo microbiano.

Varios son los factores a tener en cuenta en el almacenamiento de frutos secos, entre ellos la temperatura y disponibilidad de oxígeno. Ambos son factores externos muy importantes que afectan la calidad del producto seco durante su almacenamiento. El incremento de los mismos puede generar alteraciones sobre los atributos de calidad tales como textura, color, aw, entre otros. De aquí la importancia de la selección cuidadosa del material de empaquetamiento que permita mantener la estabilidad de los productos durante el almacenamiento.

El objetivo de este capítulo fue evaluar la factibilidad del secado combinado, seleccionado como óptimo para el procesamiento de los arándanos, y la vida útil de los productos finales a través del análisis de las condiciones de almacenamiento y material de envasado sobre algunos parámetros de calidad tal como las propiedades mecánicas, color, actividad acuosa y crecimiento microbiano.

## 5.1. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1.1. Preparación de las muestras

Las muestras secas fueron procesadas mediante el secado combinado de aire caliente-microondas a 750W descrito en el capítulo anterior. Todas las muestras fueron llevadas a una actividad acuosa de 0.55 aproximadamente.

### 5.1.2. Condiciones de almacenamiento

En orden de llevar a cabo el análisis de la calidad de los frutos secos durante el almacenamiento, los mismos fueron almacenados en bolsas de polietileno de alta densidad cerradas herméticamente (Figura 69), en una temperatura controlada a diferentes tiempos (2, 4 y 6 meses). La temperatura fue fijada a 20°C, temperatura de ambiente promedio.



**Figura 69-** Empaquetamiento de los arándanos secos durante el almacenamiento.

Cabe destacar, que el polietileno es un material comúnmente utilizado en el envasado de alimento ya que posee una baja permeabilidad del vapor de agua y gases.

### 5.1.3. Análisis de los atributos de calidad

Para el análisis de los atributos de calidad, las muestras fueron tomadas en el día de su procesamiento y a los 2, 4 y 6 meses de almacenamiento. Se analizaron el contenido de agua, actividad acuosa, cambios en las propiedades texturales y análisis microbiológico. El

análisis de color no se pudo realizar a los 120 días del almacenamiento debido a problemas técnicos con el equipo.

Tanto el contenido de agua, propiedades texturales y propiedades ópticas fueron determinadas mediante las técnicas descritas en el capítulo de deshidratación osmótica. Por otro lado la actividad acuosa fue determinada de igual forma que en el capítulo del secado por aire caliente.

El análisis microbiológico fue llevado a cabo mediante una serie de diluciones (-1, -2, -3 y -4) que fueron preparadas a partir de una solución homogénea compuesta por 10 g de muestra de arándanos secos con 90 ml de peptona estéril al 1% en erlenmeyer bajo condiciones estériles. Para los recuentos de mesófilos aerobios se utilizó como medio de cultivo Plate Count Agar (PCA) y para hongos y levaduras el cloranfenicol glucosa agar (YGC) y se incubaron durante 5 días a 31°C. La siembra fue realizada en placas de petri con 15 ml de medio de cultivo y 1 ml de muestra para la dilución de -1 (siembra en profundidad) y 100 µl para el resto de las diluciones (siembra en superficie).

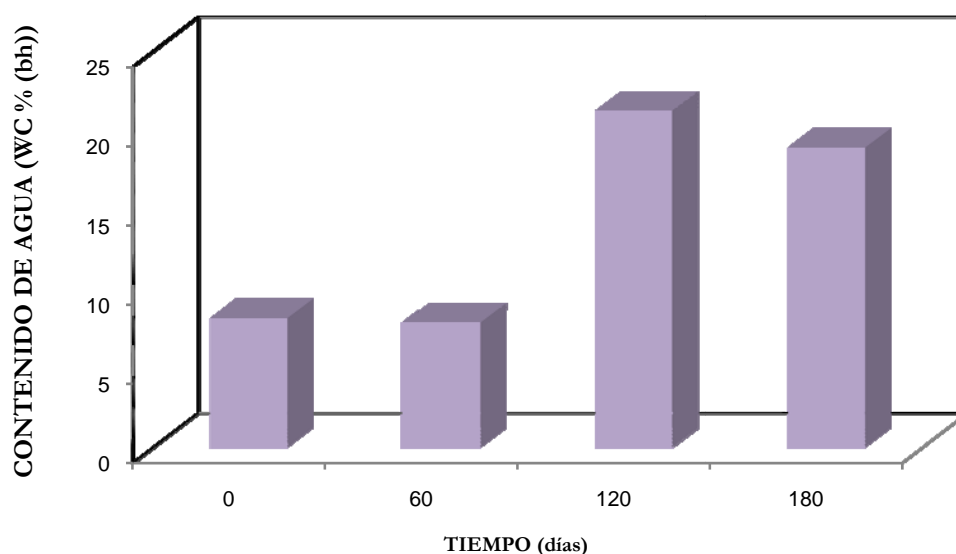
Luego del tiempo de incubación, las placas de petri con un número de colonias entre 30 y 300 para el recuento total y entre 0 y 30 para hongos y levaduras, fueron consideradas. El recuento microbiano fue expresado como UFC/g de muestra seca. Las determinaciones se realizaron por duplicado.

## 5.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los frutos utilizados para el ensayo de vida útil fueron aquellos procesados por aire caliente-microondas a 750W. Bajo estas condiciones, el contenido de agua (WC) se logró reducir de manera favorable alcanzando una actividad acuosa (*aw*) de aproximadamente 0.55, lo que permitió obtener efectos deseables en la disminución de microorganismos presentes en las frutas (<10 UFC/g de muestra seca).

Cabe destacar, que la información sobre el análisis microbiológico de los frutos deshidratados fue basada por el protocolo de calidad para pasas de uvas (WC 16-19% (bh)), presentado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Subsecretaría de Política Agropecuaria y Alimentos y Dirección Nacional de Alimentos (2006), ya que no se encontró información específica sobre estos productos.

Durante el período de almacenamiento, las muestras presentaron variaciones en el WC, *aw* y parámetros de textura como se observa en las Figuras 70, 71 y 72, respectivamente.

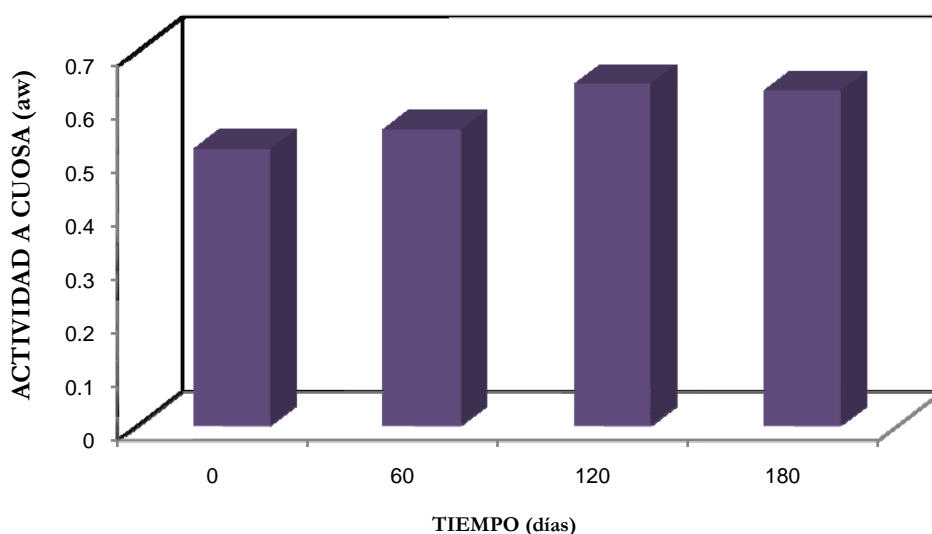


**Figura 70-** Evolución del contenido de agua (WC) durante el almacenamiento de los arándanos secos.

En la Figura 70 se puede apreciar como el material de envasado no fue lo suficientemente impermeable, generando un aumento del WC a partir de los 120 días. Al inicio del almacenamiento, las muestras tenían un WC del 8% (bh). A partir de los 120 días, el contenido de agua fue del 20% manteniéndose constante hasta el final. Si bien el aumento



fue considerable, este WC permite mantener seguros a los frutos secos, ya que no se alcanzó una actividad acuosa favorable para el crecimiento microbiano. Al final del almacenamiento, las muestras presentaron una  $a_w$  de 0.635 (Figura 71) manteniendo la estabilidad de tipo higiénico-sanitaria lograda durante el secado. El Código Alimentario Argentino, en el capítulo 7, describe las características de las frutas desecadas y el mismo indica que estos productos deben tener un WC máximo del 25% (bh). Por lo tanto nuestro producto se encontraría dentro de las normas establecidas.

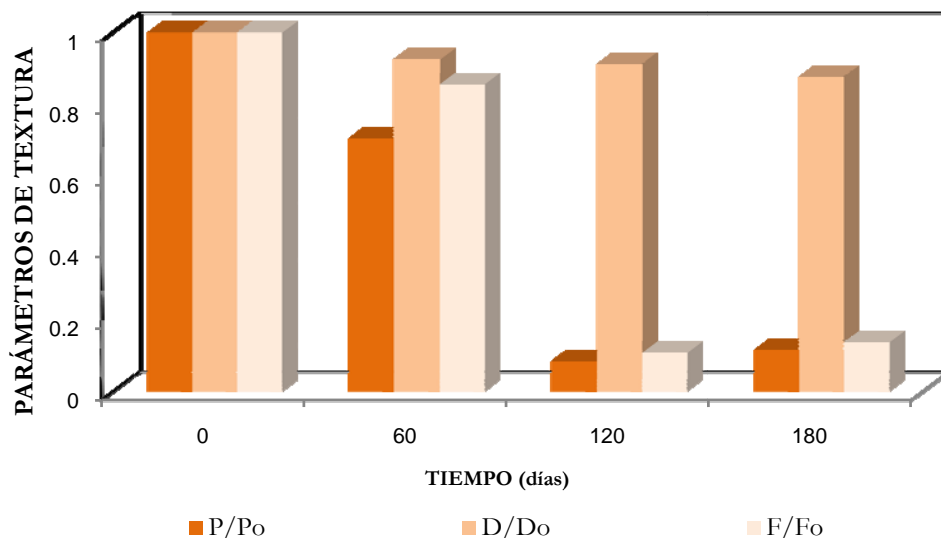


**Figura 71-** Evolución la actividad acuosa ( $a_w$ ) durante el almacenamiento de los arándanos secos.

Con respecto al análisis microbiológico, los resultados mostraron  $< 10$  UFC/g (muestra seca) en cada muestra tomada durante el almacenamiento; lo que significaría que los frutos secos fueron obtenidos bajo buenas condiciones higiénico-sanitarias y el material de envasado cumplió con la función de barrera, evitando la contaminación de las muestras dentro del ambiente de almacenamiento.

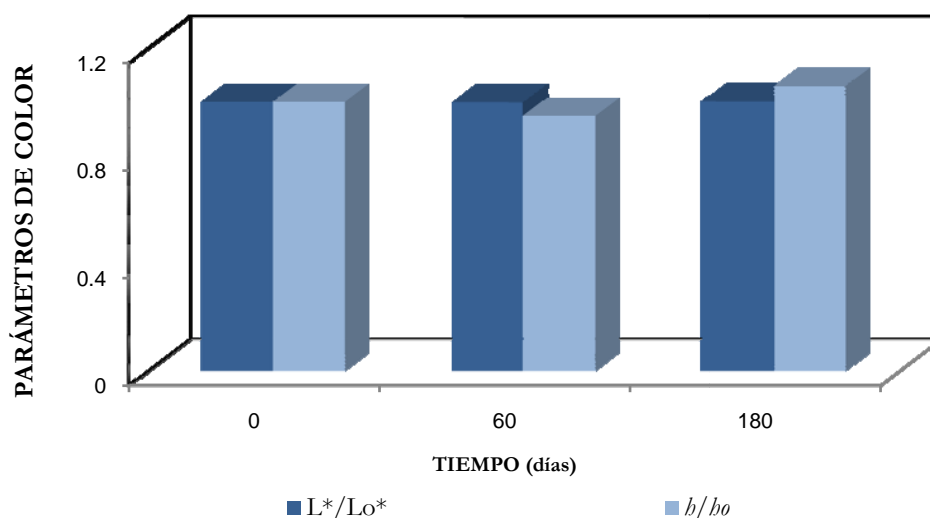
En lo que respecta a las propiedades mecánicas (Figura 72), la firmeza y rigidez de las muestras disminuyeron de manera considerable luego de los 120 días. Esto es coincidente con el aumento del WC registrado en la figura 70. Al encontrarse con mayor contenido de agua los tejidos de los frutos sufren un ablandamiento en su estructura, lo que lleva también, a una leve disminución de la resistencia de ruptura (menor deformación). Estas características podrían ser desfavorables para su aceptación por parte de los consumidores, ya que si los frutos secos se destinan para consumo final, puede que los consumidores

pretendan muestran crocantes y no blandas. El material de envasado utilizado no sería el ideal para mantener las características texturales de las muestras secas a largos tiempos de almacenamiento.



**Figura 72**-Evolución de los parámetros de textura durante el almacenamiento de los arándanos secos.

En la Figura 73, se puede observar como los parámetros de color no sufrieron modificaciones importantes durante el almacenamiento, tanto la  $L^*/Lo^*$  como  $b/bo$  se mantuvieron constantes. Hay que tener en cuenta que los frutos secos fueron almacenados en un ambiente termostatzado donde la mayor parte del tiempo se mantuvo a oscuras y a temperatura constante ( $20^{\circ}\text{C}$ ), por lo que es razonable, que el color de los frutos no haya sido afectado por la luz ni la temperatura, durante todo el almacenamiento.



**Figura 73-** Evolución de los parámetros de color al tiempo cero, 60 días y 180 días de almacenamiento de los arándanos secos

Si bien las bolsas de polietileno utilizadas para el envasado de los arándanos secos no fueron efectivas para preservar algunas características de calidad, si lo fueron como barrera frente a la contaminación microbiológica dentro del ambiente de almacenamiento, permitiendo mantener una  $a_w$  menor a 0.7 durante los 180 días.

En este trabajo, el tiempo de almacenamiento ideal para los arándanos secos envasados con bolsas de polietileno, al resguardo de la luz y a temperatura aproximadamente de 20°C manteniendo las características organolépticas de los productos, sería de 60 días.

### 5.3. CONCLUSIONES

- Durante el almacenamiento de los arándanos secos se observó que los mismos lograron mantener, durante todo el período estudiado, un contenido de agua y actividad acuosa que les permitió garantizar la estabilidad higiénico-sanitaria alcanzada durante el proceso de secado. Sin embargo el material de envasado no fue lo suficientemente impermeable para evitar que el contenido de agua y actividad acuosa aumentaran. Como consecuencia de este aumento, las características estructurales de los productos sufrieron modificaciones considerables, lo cual hace que el producto pueda no ser aceptable para ciertos consumidores. Por otro lado, el color no sufrió modificaciones, las razones que se atribuyeron fueron que las muestras se mantuvieron al resguardo de la luz y a una temperatura aproximada de 20°C, lo que hizo que los pigmentos de los frutos no se degradaran durante el almacenamiento.

---

*6. CONCLUSIONES GENERALES*

*Y*

*PROYECCIONES*

---

## 6. CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo de este trabajo, fue la obtención de productos sobre la base de frambuesas y arándanos mediante la aplicación de dos alternativas de secado combinado. Los resultados del mismo significan un aporte importante para la obtención de nuevos productos mediante la combinación de métodos de deshidratación como así también para la optimización de las operaciones mediante la reducción del costo de procesamiento en las industrias.

En una primera instancia se estudiaron la deshidratación osmótica y el secado por aire caliente. Luego de esta etapa se procedió al secado final, utilizando el secado por microondas donde se fijó el parámetro de actividad acuosa al final del proceso global: aw 0.55.

La elección de las variables de proceso se llevó a cabo por medio de un diseño multifactorial en cada uno de los métodos, teniendo en cuenta la estabilidad microbiológica y fisicoquímica de los frutos como así también las características organolépticas. Las variables seleccionadas para la deshidratación osmótica fueron la temperatura y concentración de la solución osmótica, en el secado por aire caliente la temperatura y velocidad de aire y en el secado por microondas la potencia aplicada. Lógicamente, en todos los métodos el factor tiempo también se tuvo en cuenta.

En función a lo planteado en este proyecto se logró obtener información acerca del comportamiento del secado por microondas de frambuesas y arándanos predeshidratadas osmóticamente y por aire caliente y de la influencia de las condiciones del proceso sobre las propiedades de los productos finales, al efecto de poder obtener la combinación ideal de deshidratación para lograr productos de alta calidad.

### *FRAMBUESAS*

En frambuesas, claramente se observó un mayor grado de deshidratado, ingreso de sólidos y pérdida de peso a medida que el tiempo de deshidratación osmótica era más prolongado y la concentración y temperatura de la solución incrementaba. La velocidad de secado fue disminuyendo durante el transcurso del proceso, este comportamiento se atribuyó a la disminución de la fuerza impulsora como consecuencia del intercambio de los flujos de

masa. La pérdida de peso no presentó una relación muy estrecha con la disminución del contenido de agua y aumento de los sólidos solubles ya que al final de cada deshidratación, las soluciones tenían trozos o semillas de frutos. Con respecto a la calidad, el color fue afectado mostrando una menor coloración rojiza y luminosidad a medida que el tiempo y temperatura aumentaba siendo su interacción significativa. Por otra parte los frutos fueron más blandos y menos deformables una vez finalizadas las deshidrataciones. La deformación presentada por los frutos tratados no fue muy distinta a los no tratados, ya que los primeros aún presentaban un alto contenido de agua. El cambio de la firmeza fue más significativo, lo que indicó alteraciones en la estructura celular de los tejidos como consecuencia de la mayor presión osmótica ejercida al inicio de los tratamientos. En cuanto al valor nutricional evaluado a través del análisis de la capacidad antioxidante, fue disminuyendo a medida que transcurría el tiempo de proceso y aún más, cuando las otras condiciones analizadas fueron más intensas. También se encontró una clara dependencia con respecto a la disminución del contenido de agua. Las condiciones ideales para aplicar la deshidratación osmótica como un pretratamiento en frambuesas fueron: temperatura 20°C, concentración de la solución 60°Brix durante 360 minutos. Bajo estas condiciones, se logró reducir el contenido de agua y a su vez, lograr una mayor retención de las características del fruto fresco.

En secado por aire caliente, al igual que en la deshidratación osmótica, cuanto más severas eran las condiciones de proceso, las frambuesas alcanzaban un mayor grado de deshidratado. La temperatura fue el factor de mayor importancia en este proceso. En la velocidad de deshidratado, dependiendo de las condiciones utilizadas, se observaron diferentes comportamientos como consecuencia de los efectos generados sobre las estructuras de los frutos a medida que se iban secando. En cuanto a la pérdida de peso y actividad acuosa -como era esperable- se encontró una relación estrecha con la reducción del contenido de agua. En lo que respecta a la calidad, los frutos sufrieron una decoloración en su superficie como consecuencia de la degradación de los pigmentos, obteniendo un color más claro y de tonalidad rosada, aunque no se encontraron zonas amarronadas por lo que podríamos decir que no hubo presencia de pardeamiento durante el secado. Las condiciones más intensas fueron las que provocaron mayor daño en el color superficial. En el análisis de las propiedades mecánicas, el factor que más influyó sobre ellas fue el tiempo de proceso. La temperatura y velocidad de aire solo influyeron de manera combinada, es decir la magnitud de una de ellas generó que el efecto de la otra fuera mayor. También se pudo percibir la formación de una costra sobre la superficie de los mismos. En

aquellos frutos que presentaban alto contenido de agua, la costra formada era muy frágil, por lo tanto llevó a que presentaran menor deformación, firmeza y rigidez. Cuando la remoción del agua fue mayor bajo las condiciones más severas, esta costra se hizo más rígida lo cual provocó que los frutos tengan mayor deformación, firmeza y resistencia a la ruptura. En el valor nutricional, diferentes perfiles de la capacidad antioxidante fueron observados como consecuencia de las condiciones de trabajo testeadas, siendo la temperatura y velocidad de aire los factores más significativos. Además a medida que el tiempo de proceso avanzaba, la capacidad antioxidante fue disminuyendo de manera considerable. La degradación de los componentes antioxidantes fue provocada por la oxidación de los mismos producida por las altas temperaturas y presencia de oxígeno en el aire de secado. Por lo tanto, al analizar todos los procesos de secado por aire caliente, encontramos que las condiciones ideales para la aplicación de este tratamiento previo al secado con microondas fueron temperatura de aire 60°C, velocidad de aire 1.5 m/s durante 300 min. Bajo estas condiciones se logró igual reducción del contenido de agua que en la deshidratación osmótica y menor degradación de los parámetros de calidad de los frutos.

En los métodos combinados, se encontró que la potencia intermedia (350W) fue la única que nos permitió lograr un secado con alto rendimiento de frutas con estructura íntegra. El tiempo de proceso fue afectado por la duración de los pretratamientos, ya que la duración del secado final fue igual para las muestras frescas y predeshidratadas. La pérdida de peso y actividad acuosa presentaron una relación estrecha con la disminución del contenido de agua. En la velocidad de secado, fue evidente que el comportamiento de las cinéticas es dependiente de los métodos utilizados y demostró que el deshidratado fue afectado por las propiedades intrínsecas de las muestras.

Los parámetros de calidad fueron afectados por la aplicación de microondas. En las propiedades ópticas, comparando el secado control con el método combinado secado por aire caliente-microondas se pudo determinar visualmente que las muestras deshidratadas solo con microondas presentaron zonas amarronados por las reacciones de pardeamiento debido al mayor calentamiento generado. El tratamiento combinado permitió proteger a los frutos de las reacciones de pardeamiento, si bien se produjo una decoloración del color rojo de los frutos frescos, nos permitió mantener una superficie con una coloración aceptable para el consumidor. En cuanto al método deshidratación osmótica-microondas, la presencia de brillo por el azúcar en la superficie hizo que presentara mayor luminosidad con respecto a los otros métodos. La tonalidad no varió significativamente. Sin embargo visualmente los frutos presentaron una coloración más oscura por la reacción de



caramelización. En los parámetros mecánicos, los pretratamientos tuvieron influencia sobre los frutos. Al aplicar el secado por microondas, en todos los casos se observaron iguales comportamientos presentando un incremento considerable de la rigidez y firmeza hacia el final del proceso como consecuencia de la eliminación del agua en el interior del fruto. Observando los diferentes métodos, los procesos combinados generaron estructuras más firmes y rígidas. Al comparar el parámetro deformación, se pudo establecer la presencia de estructuras compactas y porosas. En el análisis de la capacidad antioxidante todos los tratamientos provocaron una disminución de la actividad antioxidante con respecto al valor inicial. Sin embargo el método deshidratación osmótica-microondas permitió obtener una mayor retención de la actividad antioxidante en comparación a los demás métodos de secado. La razón que se atribuyó es por la sacarosa infundida dentro y sobre la superficie de las muestras, actuando como un agente protector en contra de la degradación térmica de los componentes antioxidantes. En cuanto a la capacidad de rehidratación, el secado por microondas permitió mantener la estructura de los frutos casi inalterada logrando alcanzar un 90% de rehidratación en las muestras secas con respecto al contenido de agua del material fresco. Sin embargo, fue posible observar que el comportamiento mecánico de las muestras rehidratadas fue muy diferente al de las muestras frescas, debido a la generación de ciertos daños en la matriz celular durante el secado.

El secado combinado logró productos de mejor calidad que los frutos tratados solo con microondas. Aunque el secado control fue el que requirió de menor tiempo para alcanzar la actividad acuosa establecida, la duración de los secados combinados estuvo dentro de lo que duraría una jornada laboral en la industria alimenticia, haciéndolos métodos factibles para el deshidratado de frambuesas. Por otra parte, la aplicación del secado por microondas fue un método muy útil para acortar los tiempos en comparación a lo que durarían si la deshidratación osmótica o el secado por aire caliente se utilizaran como métodos únicos para el deshidratado de frutos.

Con respecto a la calidad de las frambuesas, estos frutos son extremadamente ricos en antioxidantes y son considerados componentes claves para la buena salud. Por lo tanto, dándole prioridad a esta característica, el método que mejor retuvo su valor nutricional fue el método deshidratación osmótica-microondas. En cuanto a la apariencia, se observó que la tonalidad no fue afectada y, de lo contrario, la deshidratación osmótica le aportó brillo a la superficie. Sin embargo, su apariencia puede no ser muy aceptable, ya que el color oscuro en la superficie muchas veces se relaciona con una superficie quemada, aunque al rehidratarse esa apariencia desaparece siendo similar al fruto fresco. Por otra parte, la

capacidad de rehidratación nos demostró que los frutos secos obtenidos pueden ser utilizados como ingredientes en productos que requieran de buena hidratación, tal como en el caso de los mix de cereales o yogures con frutas. Aun así, estos productos merecen un análisis más profundo sobre su performance para ser utilizados como ingredientes en alimentos tradicionales o para consumo directo.

### *ARÁNDANOS*

En arándanos, las condiciones de deshidratación osmótica tuvieron influencia sobre los parámetros estudiados en términos de la disminución del contenido de agua, aumento de los sólidos solubles y pérdida de peso, aunque no hubo interacción entre las condiciones lo que indica un bajo efecto sobre las frutas. Las curvas de velocidad presentaron regímenes decrecientes bajo todas las condiciones aplicadas. En el parámetro de pérdida de peso obtuvimos el mismo resultado que el observado en frambuesas por lo que se concluyó que las muestras no debían ser deshidratadas a un tiempo mayor de 8 horas, para mantener un alto rendimiento en la integridad de los frutos.

En el análisis de la calidad, el color de los arándanos fue afectado principalmente por el pretratamiento aplicado sobre la piel del fruto. Este pretratamiento consistió en una solución oleosa, lo que provocó un oscurecimiento de la superficie llevando la tonalidad de los frutos hacia un azul-rojizo, en comparación al azul-violáceo de los frutos sin tratar, y con brillo en la superficie. A su vez, la deshidratación osmótica generó un incremento de los parámetros acentuando el color obtenido por el pretratamiento químico. Las respuestas mecánicas fueron similares a lo observado en frambuesas. En lo que respecta al valor nutricional, el efecto mínimo provocado por la deshidratación osmótica en estos frutos hizo que se obtuvieran valores muy dispersos, sin observarse una tendencia clara de su comportamiento durante los diferentes procesos, aunque pudo apreciarse una pequeña disminución provocada por el pretratamiento químico. Como el proceso de deshidratación osmótica no generó cambios altamente significativos, las condiciones seleccionadas fueron: 60°Brix-40°C-360min.

En el secado por aire caliente, al igual que en frambuesas, la temperatura fue el factor más importante en este proceso. La pérdida de peso y actividad acuosa presentaron igual comportamiento que en frambuesas. La velocidad de eliminación del agua transcurrió en forma decreciente pero con diferentes intensidades según las condiciones utilizadas. En la evolución de los parámetros de calidad, todos fueron afectados por las condiciones de proceso y este efecto fue más acentuado a medida que la temperatura y velocidad del aire y

tiempo incrementaban, salvo en la capacidad antioxidante donde la velocidad de aire tuvo un efecto inverso cuando se utilizaron las temperaturas 50°C y 60°C. El color, ya afectado por el pretratamiento químico, presentó una disminución de los parámetros obteniendo una coloración más azulada y opaca. A su vez, los frutos fueron más blandos, menos rígidos y menos deformables. En la capacidad antioxidante la temperatura fue el factor más importante generando una gran degradación de los componentes antioxidantes. Para que los métodos sean comparables, se seleccionaron condiciones ideales que permitiesen obtener el mismo contenido acuoso que en deshidratación osmótica pero menor degradación de los parámetros de calidad en comparación a las otras condiciones utilizadas. En arándanos estas condiciones fueron: temperatura 60°C, a una velocidad de aire de 2.5 m/s durante 90 minutos.

En el secado combinado de arándanos, diferentes comportamientos fueron observados bajo la aplicación de los métodos de secado combinado y un secado control por aire caliente. Al igual que en frambuesas, los tiempos de secado combinados fueron afectados por el tiempo que insumió el pretratamiento debido a las diferentes fuerzas impulsoras generadas por ambos pretratamientos. Cuando el secado por microondas fue aplicado, una rápida eliminación del contenido de agua se distinguió con respecto al secado control reduciendo el tiempo en un 66-73%. Con respecto a la velocidad de secado, la comparación entre el secado control con los métodos combinados nos permitió comprobar que las microondas disminuyen en gran proporción el tiempo de proceso. En lo que respecta a la actividad acuosa y la pérdida de peso, se comportaron de manera similar como en el secado de frambuesas.

En la evaluación de los parámetros de calidad, las propiedades ópticas ya presentaban modificaciones en el color como consecuencia del pretratamiento químico. Comparando los diferentes métodos de secado, el secado control no presentó modificaciones significativas. Sin embargo en el método secado por aire caliente-microondas, la tonalidad fue alterada significativamente al final del proceso como consecuencia de una mayor degradación de los pigmentos debido al calentamiento generado y a la eliminación del contenido de agua. Lo que se concluyó en este trabajo fue que los valores de luminosidad se mostraron inalterados por la presencia de brillo. La luz dispersada por el equipo utilizado, reflejó de igual forma que la claridad presentada por los frutos frescos. Luego del deshidratado, visualmente los frutos presentaron una coloración más rojiza y con menos brillo. Aun así, los resultados obtenidos fueron positivos ya que se logró deshidratar los frutos sin llegar a la carbonización de los mismos. Los parámetros de textura exhibieron

similares comportamientos en la rigidez y firmeza, independiente del método utilizado. En el caso de la deformación, las muestras tratadas con SAC-MO622.5W presentaron diferentes comportamientos. Al igual que en frambuesas, en la mayor parte del transcurso de secado, los arándanos sufrieron un mayor ablandamiento y hacia el final, al alcanzarse un mayor porcentaje de eliminación de agua, provocó modificaciones en el contenido de componentes solubles en la fase acuosa, obteniendo muestras con mayor rigidez y firmeza. El secado control fue el que permitió obtener mayor capacidad antioxidante en comparación a las muestras tratadas por los métodos combinados. No obstante, en el secado control la disminución de la capacidad antioxidante fue progresiva a medida que el tiempo de proceso avanzaba, en cambio, los secados combinados presentaron un comportamiento equivalente al obtenido en frambuesas. Hacia el final de los procesos, las muestras presentaron entre un 20-30% de inhibición radicalaria. El mayor porcentaje se obtuvo cuando las muestras fueron tratadas con la mayor potencia, debido al menor tiempo que llevó alcanzar el contenido de agua establecido. En cuanto a la capacidad de rehidratación, fue mucho menor comparada con las frambuesas. Una de las razones principales fue la presencia de la piel que poseen los arándanos, la cual tiene poros muy pequeños con respecto a los frutos sin piel. El calentamiento de las muestras generó la caramelización del azúcar, obstruyendo la difusión del agua hacia el interior de los mismos. Aun así, el secado por microondas permitió mayor capacidad de rehidratación que los frutos tratados por aire caliente. Con respecto a las propiedades mecánicas, nunca se alcanzaron las obtenidas por los frutos frescos.

En lo que respecta a los arándanos secos por métodos combinados, ambas alternativas no permitieron obtener una alta capacidad de rehidratación de los frutos, lo cual los limita para su aplicación como ingrediente de productos que requieran de alto índice de rehidratación como son las frutas puestas en yogures o en mix con cereales. Por otra parte, ambos tratamientos no permitieron proteger los componentes antioxidantes que se encuentran en su mayoría sobre la piel de los frutos, otra de las causas del menor valor nutricional fue la aplicación del pretratamiento químico. Con respecto al color, no hubo una degradación considerable del mismo. La solución oleosa permitió obtener productos con apariencia que podría ser aceptable por parte de los consumidores. En consecuencia de todos estos resultados, el método seleccionado como el mejor ya sea por los parámetros de calidad como así también tiempo de proceso, es el secado por aire caliente-microondas a 750W. Como se dijo anteriormente en frambuesas, esta decisión no sería la definitiva ya que lo ideal es que estos frutos sean evaluados sensorialmente para obtener una opinión más acertada sobre cuál de los procesos es el ideal.

En base a la selección del método ideal para el secado de arándanos, se ensayó una prueba de vida útil durante 6 meses, envasado en bolsas de polietileno bajo las condiciones ambientales presentes en la habitación de almacenamiento. Durante el mismo se observó que los arándanos lograron mantener un contenido de agua y actividad acuosa adecuados, garantizando la estabilidad higiénico-sanitaria alcanzada durante el proceso de secado. Sin embargo el material de envasado no fue lo suficientemente impermeable para evitar que el contenido de agua y actividad acuosa aumentaran, generando modificaciones estructurales que no pueden ser aceptables para el consumidor. Por lo tanto, se aconsejaría un tiempo de almacenamiento menor al que se practicó en este trabajo o el análisis de otros materiales de envasado que permitiesen mantener las características del producto final luego de su procesamiento.

### 6.1. PROYECCIONES

Como futuras proyecciones se propone:

- ✓ Realizar el análisis microestructural de las muestras, para poder analizar con mayor exactitud el impacto que generan las condiciones de secado sobre los productos biológicos.
- ✓ Analizar el comportamiento de los componentes antioxidantes de los frutos en las distintas etapas de proceso, para determinar con mayor profundidad lo que sucede con dichos compuestos cuando son expuestos a las diferentes condiciones.
- ✓ Realizar una evaluación sensorial que nos permita definir la posible aplicación de los productos, ya sea para consumo directo o solo como ingredientes de otros.
- ✓ Realizar un análisis costo/beneficio y así estipular si el método seleccionado es interesante y factible para las industrias nacionales, permitiendo producir alimentos saludables con un mejor aprovechamiento de estos frutos en nuestro país.
- ✓ Realizar ensayos de vida útil con diferentes materiales de envasado y atmósfera para lograr una mayor conservación de las características de los arándanos secos. A su vez, realizar un ensayo de vida útil en frambuesas deshidratadas de igual forma a la propuesta para arándanos.

---

## *7. TRANSFERENCIA DE RESULTADOS*

---

## 7. TRANSFERENCIA DE RESULTADOS

### 7.1. *Revista*

- GENERALIZED CORRELATIONS FOR CHARACTERISTIC VARIABLES AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF OSMOTICALLY DEHYDRATED FRUITS. Autores: Rodriguez Anabel y Mascheroni Rodolfo H. Drying Technology, 30: 11-12, 1323-1331 (2012).
- SOME THERMAL PROPERTIES OF FRESH AND OSMOTICALLY DEHYDRATED STONE FRUITS: EXPERIMENTAL VALUES AND CORRELATIONS. Autores: Rodriguez Anabel, Rodríguez María Marcela y Mascheroni Rodolfo Horacio. (Submission code: IJPTI-66675) for the International Journal of Postharvest Technology and Innovation

### 7.2. *Congresos*

- "COMPARACIÓN DE MÉTODOS COMBINADOS PARA EL SECADO DE ARÁNDANOS VARIEDAD O'NEAL" Rodriguez Anabel y Mascheroni Rodolfo H. Modalidad póster. Trabajo completo aprobado y publicado en el CD del congreso. XIV Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos "Hacia nuevos desafíos en la innovación de alimentos, desarrollo sustentable y bienestar nutricional". Rosario, octubre 2013.
- "EFECTOS DE LAS CONDICIONES DEL PRETRATAMIENTO OSMÓTICO EN LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE FRAMBUESAS VARIEDAD HERITAGE". Rodriguez A., Pagano A.M, Mascheroni R.H. Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. CLICAP 2012. Trabajo completo publicado. San Rafael, Mendoza. Marzo 2012.
- EVALUACIÓN DEL COLOR DURANTE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE FRAMBUESAS A DIFERENTES TEMPERATURAS. Rodriguez Anabel, Pagano Ana M., Mascheroni Rodolfo H. XIII Congreso Cytal. Congreso Argentino de Ciencia y



Tecnologías de alimentos. Trabajo completo publicado en el CD del congreso y presentación póster (con referato). Puerto Madero, Buenos Aires. Octubre 2011.

- APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA DESHIDRATACIÓN OSMOTICA EN FRAMBUESAS. Rodriguez Anabel, Pagano Ana M., Mascheroni Rodolfo H. VI CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA QUIMICA. Aportes de la Ingeniería Química a los desafíos y oportunidades del siglo XXI. Trabajo completo publicado en CD de congreso y presentación oral. (Con referato). Mar del Plata, Buenos Aires. Septiembre 2010.
- OPTIMIZACIÓN DEL PARÁMETRO DE COLOR EN LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE FRAMBUESAS (VARIEDAD HERITAGE). Rodriguez Anabel, Pagano Ana María, Mascheroni Rodolfo Horacio XXVIII CONGRESO ARGENTINO DE QUIMICA. 4º Workshop de Química Medicinal. Lanús, Buenos Aires. Septiembre 2010.

---

## *8. NOMENCLATURA*

---

**8. NOMENCLATURA**

<b>ABTS<sup>+</sup></b>	2,2'-azino-bis(3-thylbenzthiozoline-6-sulphonic acid)
<b>a*</b>	Enrojecimiento
<b>aw</b>	Actividad acuosa
<b>aw<sub>o</sub></b>	Actividad acuosa del fruto fresco
<b>b*</b>	Amarillamiento
<b>cp</b>	Calor específico (J/(°C*kg))
<b>CR</b>	Capacidad de rehidratación
<b>D</b>	Deformación o resistencia a la ruptura (mm)
<b>Do</b>	Deformación o resistencia a la ruptura del fresco (mm)
<b>DPPH</b>	2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazyl
<b>F</b>	Fuerza máxima (N)
<b>Fo</b>	Fuerza máxima del fresco (N)
<b>h</b>	Ángulo de hue o tonalidad
<b>ho</b>	Ángulo de hue o tonalidad de fruto fresco
<b>L*</b>	Luminosidad
<b>Lo*</b>	Luminosidad del fruto fresco
<b>m<sub>a</sub></b>	Masa de agua (g)
<b>m<sub>f</sub></b>	Masa final (g)
<b>m<sub>i</sub></b>	Masa inicial (g)

<b>m<sub>r</sub></b>	Masa rehidratada (g)
<b>P</b>	Pendiente o rigidez (N/mm)
<b>Po</b>	Pendiente o rigidez del fresco (N/mm)
<b>SS</b>	Sólidos solubles (°Brix)
<b>SSo</b>	Sólidos solubles del fruto fresco(°Brix)
<b>ΔT°</b>	Diferencia de temperatura (°C)
<b>t</b>	Tiempo (min)
<b>VS</b>	Velocidad de secado (g H <sub>2</sub> O / g masa seca.min)
<b>W</b>	Potencia (watts)
<b>WC</b>	Contenido de agua (%)
<b>WCo</b>	Contenido de agua del fruto fresco (%)
<b>WR</b>	Pérdida de peso (%)

---

## *9. BIBLIOGRAFÍA*

---

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, M.F., Gely, M.C. y Pagano, A.M., (2006).** Estudio de la deshidratación de hongos comestibles de la especie *Agaricus bisporus*. *Actas del Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los ALIMENTOS* (ISBN 987-22457-9-7), 1a. edición – Córdoba: Agencia Córdoba Ciencia. Córdoba. P95: 191.
- Acuña, M.F., (2008).** “Deshidratación y rehidratación de Hongos Comestibles o Silvestres”. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Facultad de Ingeniera. Tesis para la Licenciatura en Tecnología de los Alimentos.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. and Arabhosseini, A., (2009).** Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Engineering* 91: 99–108.
- Ait Mohamed, L., Ethmane Kane, C.S., Kouhilam, M., Jamali, A., Mahrouz, M. and Kechaou, N., (2008).** Thin layer modelling of *Gelidium sesquipedale* solar drying process. *Energy Conversion and Management*, 49: 940-946.
- Akpınar, E.K., Midilli, A. and Bicer, Y., (2003).** Experimental investigation of drying behaviour and conditions of pumpkin slices via a cyclone- type dryer. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83: 1480–1486.
- Allali, H., Marchal, L. and Vorobiev, E., (2010).** Effects of vacuum impregnation and ohmic heating with citric acid on the behaviour of osmotic dehydration and structural changes of apple fruit. *Biosystems engineering* 106: 6 –13.
- Andrés, A., Bilbao, C. and Fito, P., (2004).** Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *Journal of Food Engineering* 63: 71-78.
- AOAC, (1980).** Official methods of analysis (13th ed.). Washington,DC: Association of Official Analytical Chemists
- Asami, D.K., Hong, Y., Barrett, D.M. and Mitchell, A.E., (2003).** Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51: 1237-1241.
- Babalís, S. J. and Belessiotis, V. G., (2004).** Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65: 449–458.
- Barbosa-Cánovas, G.V. and Vega-Mercado, H., (1996)** *Dehydration of foods*. New York: Chapman and Hall. ISBN: 0-412-06421-9.

- Beaudry, C., (2001).** Evaluation of drying methods on osmotically dehydrated cranberries. Unpublished M.Sc. thesis. Montreal, QC: Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University.
- Beaudry, C., Raghavan, G.S.V., Ratti, C. and Rennie, T.J., (2004).** Effect of Four Drying Methods on the Quality of Osmotically Dehydrated Cranberries. *Drying Technology* 22 (3): 521-539.
- Berteli, M. N. and Marsaioli, A. Jr., (2005).** Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process. *Journal of Food Engineering*, 68(2): 175–183.
- Blanda, G., Carretani, L., Cardinali, A., Barbieri, S., Bendini, A. and Lercker, G., (2009).** Osmotic dehydrofreezing of Strawberries: polyphenolic content, volatile profile and consumer acceptance. *Food Science and Technology*. 42: 30-36.
- Bórquez, R.M., Canales, E.R. and Redon, J.P., (2010).** Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering* 99: 121–127.
- Botha, G.E., Oliveira, J.C. and Ahn, L., (2012).** Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission. *Food and Bioproducts Processing* 90: 171–179.
- Cao, G., Sofic, E. and Prior, R. L., (1996).** Antioxidant capacity of tea and common vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44: 3426–3431.
- Castelló, M.L., Fito, P.J. and Chiralt, A., (2010).** Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. *Journal of Food Engineering* 97: 64-71.
- Chiralt, A., Martinez-Navarrete, N., Martinez-Monzó, J., Talens, P. and Moraga, G., (2001).** Changes in mechanical properties throughout osmotic processes: Cryoprotectant Effect. *Journal of Food Engineering*, 49: 129-135.
- Chiralt, A. and Talens, P., (2005).** Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67:167–177.
- Código Alimentario Argentino.**  
<http://www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/marco/marco2.php>. Visado 16-03-14.
- Contreras, C., Martín Esparza, M.E., Martínez-Navarrete, N. and Chiralt, A., (2005).** Effect of vacuum impregnation and microwave application on structural

changes which occurred during air-drying of apple. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 38: 471-477.

**Contreras Monzón, C., Martín Esparza, M.E. and Martínez-Navarrete, N., (2006).**

Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas. Tesis doctoral presentada en el departamento de tecnología de alimentos. Universidad politécnica de Valencia. Valencia.

**Contreras, C., Martín-Esparza, M.E., Martínez-Navarrete, N. and Chiralt, A.,**

**(2007).** Influence of osmotic pre-treatment and microwave application on properties of air dried strawberry related to structural changes. *European Food Research and Technology* 224: 499–504.

**Contreras, C., Martín-Esparza, M.E., Chiralt, A. and Martínez-Navarrete, N.,**

**(2008).** Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering* 88: 55–64.

**Deepa, N., Kaura, C., George, B., Singh, B. and Kapoor, H., (2007).**

Antioxidant constituents in some sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes during maturity. *LWT: Food Science and Technology*, 40: 121–129.

**Della Rocca, P. and Mascheroni, R., (2011).**

Deshidratación de papas por métodos combinados de secado: deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente. *Proyecciones* 9 (2): 11-26.

**Demarchi, S.M, Quintero, N.A., Concellón, A. and Giner, S., (2013).**

Effect of temperature on hot-air drying rate and on retention of antioxidant capacity in apple leathers. *Food and Bioproducts Processing* 91: 310–318.

**Desmorieux, H. and Decaen, N., (2005).**

Convective drying of spirulina in thin layer. *Journal of Food Engineering*, 66: 497-503.

**Díaz, G. R., Martínez-Manzo, J., Fito, P. and Chiralt, A., (2003).**

Modelling of dehydration – rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative. Food Science and Emerging Technologies*, 4: 203 – 209.

**Djendoubi Mrad, N., Boudhriouad, N., Kechaouc, N., Courtoisa, F. and Bonazzia,**

**C. (2012).** Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears. *Food and Bioproducts Processing* 90: 433–441.



- Doymaz, I. and Pala, M., (2002a).** The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52: 413–417.
- Doymaz, I. and Pala, M., (2002b).** Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering* 55: 331–335.
- Doymaz, I. and Pala, M., (2003).** The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60: 125–130.
- Doymaz, I., (2004).** Effect of pre-treatments using potassium metabisulphide and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots. *Biosystems Engineering* 89: 281–287.
- Doymaz, I., (2005).** Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering* 69: 275-279.
- Doymaz, I., (2007a).** The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering* 79: 243–248.
- Doymaz, I., (2007b).** Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering* 78:591–596.
- Drouzas, A.E. and Schubert, H., (1996).** Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering* 28: 203–209.
- El-Aouar, A.A., Azoubel, P.M. and Xidieh Murr, F.E., (2003).** Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya L.*). *Journal of Food Engineering* 59: 85–91.
- El-Aouar , Â.A., Azoubel, P.M, Barbosa, J.L. and Xidieh Murr, F.E., (2006).** Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya L.*). *Journal of Food Engineering* 75: 267–274.
- Erle, U. and Schubert, H., (2001).** Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *Journal of Food Engineering* 49: 193-199.
- Femenia, A., Garcia-Pascual, P., Simal, S. and Rossello, C., (2003).** Effects of heat treatment and dehydration on bioactive polysaccharide acemannan and cell wall polymers from Aloe barbadensis Miller. *Carbohydrate Polymers* 51: 397–405.
- Fernández-Pachón, M.S., Villaño, D., Troncoso, A.M. and García-Parrilla, C., (2006).** Revisión de los métodos de evaluación de la actividad antioxidante in vitro del vino y valoración de sus efectos in vivo. Facultad de Farmacia, Universidad de Sevilla. Sevilla.España ALAN v.56 n.2 Caracas jun. 2006[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0004-06222006000200002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0004-06222006000200002&script=sci_arttext).

- Figiel, A., (2010).** Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering* 98: 461–470.
- Forni, E., Polesello, A. and Torreggiani, D., (1993).** Changes in anthocyanins in cherries (*Prunus avium*) during osmodehydration, pasteurization and storage. *Food Chemistry* 48: 295-299.
- Forni, E., Sormani, A., Scalise, S. and Torreggiani, D., (1997).** The influence of sugar composition on the colour stability of osmodehydrofrozen intermediate moisture apricots. *Food Research International*, 30 (2): 87–94.
- Frankel, E.N. and Meyer, A.S., (2000).** The problems of using one-dimensional methods to evaluate multifunctional food and biological antioxidants. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80: 1925-1941.
- Funebo, T. and Ohlsson, T., (1998).** Microwave assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering* 38: 353–367.
- Garau, M.C., Simal, S., Roselló, C. and Femenia, A., (2007).** Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium v. Canoneta*) by-products. *Food Chemistry* 104: 1014–1024.
- García Mahecha, M., Cortes Rodríguez, M. and Rodríguez Sandoval, E., (2010).** Evaluación del secado de perejil aplicando técnicas de deshidratación osmótica como pretratamiento. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 63: 5693-5705.
- Ghamena, N., Mihoubib, D., Kechaoua, N. and Mihoubic, N.B., (2012).** Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content. *Industrial Crops and Products* 40: 167– 177.
- Giovanelli, G., Brambilla, A., Rizzolo, A. and Sinelli, N., (2012).** Effects of blanching pre-treatment and sugar composition of the osmotic solution on physico-chemical, morphological and antioxidant characteristics of osmodehydrated blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Research International* 49: 263–271.
- Gogus, F. and Maskan, M., (1999).** Water adsorption and drying characteristics of okra (*Hibiscus esculentus* L.). *Drying Technology* 17: 883–894.

- Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J. and Oliveira, J., (2006).** Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave—hot air combination drying. Trends in Food Science and Technology 17(4): 177–183.
- Guiné, R.P.F. and Barroca, M.J., (2012).**Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). Food and bioproducts processing 90: 58–63.
- Gunasekaran, S., (1999).**Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. Drying Technology, 17: 395-412.
- Gutierrez-Ortiz, A., Figiel, A., Wojdyło, A., Juszczak, P., Vazquez-Araujo, L. and Carbonell-Barrachina, A.A., (2008).** Drying of rosemary herb by a combination of convective and vacuum-microwave methods.In: Proceedings of the II Congreso Iberoamericano sobre Seguridad Alimentaria, Barcelona, España.
- Halliwell, B., Aeschbach, R., Löliker, J. and Aruoma, O.I., (1995).** The characterization of antioxidants. Food Chemical Toxicity, 33: 601–617.
- Haas, G.J., Prescott, H.E. and Cante, C.J., (1974).** On rehydration and respiration of dry and partially dried vegetables. Journal of Food Science 39: 681.
- Hawkes, J. and Flink, J.M., (1978).** Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. Journal of Food Processing Preservation 2: 265–284.
- Hawladar, M.N.A., Perera, C.O., Tian, M. and Yeo, K.L., (2006).** Drying of guava and papaya: impact of different drying methods. Drying Technology 24: 77–87.
- Heredia, A., Peinado, I., Rosa, E. and Andrés, A., (2010).** Effect of osmotic pre-treatment and microwave heating on lycopene degradation and isomerization in cherry tomato. Food Chemistry 123:92–98.
- <http://alimentosparacurar.com/n/3330/beneficios-de-las-frambuesas-para-la-salud.html>  
fecha de visado: 26-05-13.
- <http://climafrutal.wordpress.com/el-arandano/> fecha de visado: 26-05-13.
- <http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/115000-119999/115439/norma.htm>.  
fecha de visado: 26-05-13.
- <http://www.sinavimo.gov.ar/cultivo/ar%C3%A1ndano> fecha de visado: 26-05-13.
- [http://www.conal.gov.ar/actas/Acta\\_76\\_Anexo01.pdf](http://www.conal.gov.ar/actas/Acta_76_Anexo01.pdf). fecha de visado: 26-05-13.
- [http://www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/revista/ediciones/44/cadenas/r44\\_07\\_Frambuesas.pdf](http://www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/revista/ediciones/44/cadenas/r44_07_Frambuesas.pdf) fecha de visado: 26-05-13.
- <http://www.serida.org/publicacionesdetalle.php?id=5174> fecha de visado: 26-05-13.

- Ihns, R., Diamante, L.M., Geoffrey, P. and Vanhanen, L., (2011).**Effect of temperature on the drying characteristics, colour, antioxidant and beta-carotene contents of two apricot varieties. *International Journal of Food Science & Technology*, 46: 275-283.
- Islam, M.N. and Flink, J.M., (1982).** Dehydration of potato. II Osmotic concentration and its effects on air drying behaviour. *Journal of Food Technology* 17: 387–403.
- Kalt, W., McDonald, J.E. and Donner, H., (2001).** Anthocyanins, phenolics, and antioxidant capacity of processed lowbush blueberry products. *Journal of Food Science* 65: 390–393.
- Karathanos, V.T. and Kostaropoulos, A.E., (1995).** Air-drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology* 13: 1503-1521.
- Kaymak-Ertekin, F. and Sultanoğlu, M., (2000).** Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering* 46: 243–250.
- Kaymak-Ertekin, F., (2002).** Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science* 67:168–175.
- Ketata, M., Desjardins, Y. and Ratti, C., (2013).** Effect of liquid nitrogen pretreatments on osmotic dehydration of blueberries. *Journal of Food Engineering* 116: 202-212.
- Kowalska, H. and Lenart, A., (2001).** Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables. *Journal of Food Engineering* 49: 137–140.
- Krokida, M. K., Karathanos, V. T. and Maroulis, Z. B., (1998).** Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering* 35: 369–380.
- Krokida, M. K. and Maroulis, Z. B., (1999).** Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. *Drying Technology*, 17: 449–466.
- Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D., (2000).** Effect of pretreatment on colour of dehydrated products. *Drying Technology* 18: 1239–1250.
- Krokida, M. and Maroulis, Z., (2001).** Quality changes during drying of food materials. *Drying technology in agriculture and foods sciences*, 1-44. Published by Oxford IBH, Delhi, India.
- Krokidas, M.K. and Marinos-Kouris, D., (2003).**Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering* 57: 1–7.

- Laguerre, M., Lecomte, J. and Villeneuve, P., (2007).** Evaluation of the ability of antioxidants to counteract lipid oxidation: Existing methods, new trends and challenges. *Progress in Lipid Research* 46:244–282.
- Lakshminarayana Reddy, (2006).** Drying Characteristics of Saskatoon Berries under Microwave and Combined Microwave-Convection Heating. Tesis presentada a la Facultad de Estudios Graduados e Investigación en cumplimiento de los requisitos para el grado de Master de la Ciencia en el departamento Departamento de Agricultura y Ingeniería de Recursos Biológicos, Universidad de Saskatchewan, Saskatoon.
- Lemus, R., Pérez, M., Andrés, A., Roco, T., Tello, C. and Vega, A., (2008).** Kinetic study of dehydration and desorption isotherms of red alga *Gracilaria*. *LWT-Food Science and Technology* 41: 1592-1599.
- Lewicki, P. P. and Drzewucka-Bujak, J., (1998).** Effect of drying on tissue structure of selected fruits and vegetables. In C. B. Akritidis, D. Marinos-Kouris, A. S. Mujumdar, y G. D. Saravacos (Eds.), *Proceedings of the 11th international drying symposium* (Vol. B, pp.1093–1099). Thessaloniki: Ziti Editions.
- Lewicki, P.P. and Lukaszuk, A., (2000).** Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *Journal of Food Engineering* 45: 119-126.
- Lewicki, P.P. and Jakubczyk, E., (2004).** Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering* 64: 307–314.
- Li, B.B., Smith, B. and Hossain, M.D.M., (2006).** Extraction of phenolics from citrus peels. I. Solvent extraction method. *Separation and Purification Technology* 48: 182–188.
- Lim, Y.Y. and Murtijaya, J., (2007).** Antioxidant properties of *Phyllanthus amarus* extracts as affected by different drying methods. *LWT Food Science and Technology* 40: 1664-1669.
- Lin, T.M., Durance, T.D. and Scaman, C.H., (1998).** Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International* 31: 111-117.
- Mandala, I.G., Anagnostaras, E.F. and Oikonomou, C.K., (2005).** Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering* 69: 307-316.

- Maroulis, Z.B. and Saravacos, G.D., (2003).** Food process design, 1st Ed: New York, USA: Marcel Dekker (pp. 243–244).
- Maskan, M., (2000).** Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44: 71–78.
- Maskan, M., (2001).** Kinetics of color change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48: 169-175.
- Mayor, L., Pisarra, J. and Sereno, A.M., (2008).** Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue. *Journal of Food Engineering* 85: 326–339.
- Mejía-Meza, E., Yanez, J., Davies, N., Rasco, B., Younce, F., Remsberg, C. and Clary, C., (2008).** Improving nutritional value of dried blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) combining microwave-vacuum, hot-air drying and freeze drying technologies. *Int. J. Food Eng.* 4 (5), Art. 5.
- Moo-Huchin, V.M., Estrada-Mota, I., Estrada-León, R., Cuevas-Glory, L., Ortiz-Vázquez, E., Vargas y Vargas, A.D.L., Betancur-Ancona, D. and Sauri-Duch, E., (2013).** Determination of some physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of tropical fruits from Yucatan, Mexico, *Food Chemistry* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.013>. Available online 11 December 2013.
- Moreno, J., Bugueño, G., Velasco, V., Petzold, G. and Tabilo-Munizaga, G., (2004).** Osmotic dehydration and vacuum impregnation on physicochemical properties of chilean papaya (*Carica candamarcensis*). *Journal of Food Science*, 69: 102-106.
- Moreno, J., Simpson, R., Baeza, A., Morales, J., Muñoz, C., Sastry, S. and Almonacid, S., (2012).** Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmodehydration kinetics and microstructure of strawberries (*cv. Camarosa*). *LWT - Food Science and Technology* 45: 148-154.
- Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., Lopez-Malo, A., Palou, E. and Welti-Chanes, J., (2003).** Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering* 57: 305–314.
- Nguyen, M. and Price, W.E., (2007).** Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering* 79:200–207.

- Nieto, A., Catro ,M.A. and Alzamora, S.M. , (2001).** Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering* 50: 175-185.
- Nieto, A.B., Salavatori, D.M., Castro, M.A. and Alzamora, S.M (2004).** Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering* 61: 269–278.
- Njintang, Y. N. and Mbofung, C.M.F., (2003).** Development of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) flour as an ingredient for food processing: Effect of gelatinization and drying temperature on the dehydration kinetics and colour of flour. *Journal of Food Engineering* 58: 259–265.
- Nsonzi F. and Ramaswamy H.S. (1998).** Quality evaluation of osmo-convective dried blueberries. *Drying Technology*, 16: 705-723.
- Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L. and Sarsavadia, P.N., (1999).** Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of Thompson seedless grapes. *Journal of Food Engineering* 39: 211-216.
- Park, K.J., Bin, A. and Reis Brod, F.P., (2002).** Drying of pear d’Anjou with and without osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering* 56: 97–103.
- Pellegrini, N., Serafini, M., Colombi, B., Del Rio, D., Salvatore, S. and Bianchi, M., (2003).** Total antioxidant capacity of plant foods, beverages and oils consumed in Italy assessed by three different in vitro assays. *Journal of Nutrition* 133: 2812–2819.
- Pereira, L.M., Ferrari, C.C., Mastrantonio, S.D.S., Rodrigues, A.C.C and Hubinger M.D., (2006).** Kinetics aspects, texture, and color evaluation of some tropical fruits during osmotic dehydration. *Drying Technology* 24: 475-484.
- Perera, C.O., (2005).** Selected quality attributes of dried foods. *Drying Technology* 23: 717–730.
- Peterson, D. M., (2001).** Oat antioxidants. *Journal of Cereal Science* 33: 115–129.
- Piotrowski, D., Lenart, L. and Pomarańska-Łazuka, W., (2002).** Quality assessment of dried stoned fruits initially dehydrated osmotically (Ocena jakości suszonych owoców pestkowych poddanych odwadnianiu osmotycznemu). In *Inżynieria Rolnicza*, 6(5[38], Part II), 249–257 (in Polish).

- Prinzivalli, C., Brambilla, A., Maffi, D., Lo Scalzo, R. and Torregiani, D., (2006).** Effect of osmosis time on structure, texture and pectin composition of strawberry tissue. *European Food Research and Technology* 224: 119-127.
- Prior, R. L., Wu, X., and Schaich, K., (2005).** Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53: 4290–4302.
- Prothon, F., Ahrné, L., Funebo, T., Kidman, S., Langton, M. and Sjöholm, I., (2001).** Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *LWT- Food Science and Technology* 34: 95-101.
- Rahman, M.S. and Perera, C.O., (1999).** Drying and food preservation. In M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of food preservation* (pp. 173–216). New York: Marcel Dekker.
- Ramallo, L.A. and Mascheroni, R.H., (2012).** Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioprocess Technology* 90: 275–283.
- Ramarathnam, N., Osawa, T., Ochi, H. and Kawakishi, S., (1995).** The contribution of plant food antioxidants to human health. *Trends in Food Science and Technology* 6: 75–82.
- Ramaswamy, H.S and Nsonzi F., (1998).** Convective air drying kinetics of osmotically pretreated blueberries. *Drying Technology* 16: 743-759.
- Raouzeos, G.S. and Saravacos, G.D., (1986).** Solar drying of raisins. *Drying Technology* 4: 633-649.
- Rastogi, N.K. and Raghavarao, K.S.M.S., (1996).** Kinetics of osmotic dehydration under vacuum. *LWT- Food Science and Technology* 29: 669–72.
- Reyes, A., Cerón, S., Zuñiga, R. and Moyano, P., (2007).** A comparative study of microwave-assisted air drying of potato slices. *Biosystems Engineering* 98: 310-318.
- Rodrigues, S. and Fernandes, F.A.N., (2007).** Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying. *Journal of Food Engineering* 80: 678–687.
- Sablani, S. S., Rahman, M. S. and Al-Sadeiri, D. S., (2002).** Equilibrium distribution data for osmotic drying of apple cubes in sugar-water solution. *Journal of Food Engineering* 52: 193–199.
- Sakihama, Y., Cohen, M., Grace, S. and Yamasaki, H. (2002).** Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: Phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. *Toxicology* 177: 67–80.



- Sereno, A.M., Moreira, R. and Martinez, E., (2001).** Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering* 47: 43–49.
- Shi, X.Q., Fito, P. and Chiralt, A., (1995).** Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *Food Research International*, 28: 445-454.
- Shi, J., Pan, Z., McHugh, H. and Hirschberg, E., (2009).** Effect of infusion method and parameters on solid gain in blueberries. *Food Bioprocess Technol* 2: 271–278.
- Sinelli, N., Casiraghi, E., Barzaghi, S., Brambilla, A. and Giovanelli, G., (2011).** Near infrared (NIR) spectroscopy as a tool for monitoring blueberry osmo–air dehydration process. *Food Research International* 44: 1427–1433.
- Sobukola, O., (2009).** Effect of pre-treatment on the drying characteristics and kinetics of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) slices. *International Journal of Food Engineering*, 5(2) (Article 9).
- Sogi, D.S., Shivhare, U.S., Garg, S.K. and Bawa, A.S., (2003).** Water sorption isotherms and drying characteristics of tomato seeds. *Biosystems Engineering* 84: 297–301.
- Soto, P.G., (2002).** Deshidratación osmótica: alternativa para conservación de frutas tropicales. XXX Aniversario de Biotecnología y Bioingeniería. *Avance y Perspectiva* 21: 321-324.
- Stojanovic, J. and Silva, J.L., (2007).** Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries. *Food Chemistry* 101: 898–906.
- Su, M. and Chien, P., (2007).** Antioxidant activity, anthocyanins, and phenolics of rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei*) fluid products as affected by fermentation. *Food Chemistry* 104: 182–187.
- Sunjka, P.S., Rennie, T.J., Beaudry, C. and Raghavan, G.S.V., (2004).** Microwave-convective and microwave-vacuum drying of cranberries: A comparative study. *Drying Technology* 22: 1217-1231.
- Suvarnakuta, P., Chaweerungrat, Ch. and Devahastin, S., (2011).** Effects of drying methods on assay and antioxidant activity of xanthenes in mangosteen rind. *Food Chemistry* 125: 240–247.
- Taiwo, K.A., Angersbach, A. and Knorr, D., (2002).** Rehydration studies on pretreated and osmotically dehydrated apple slices. *Journal of Food Science* 67: 842–847.

- Telis, V.R.N., Murari, R.C.B.D.L. and Yamashita, F., (2004).** Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. *Journal of Food Engineering* 61: 253–259.
- Tello-Ireland, C., Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., López, J. and Di Scala, K., (2011).** Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. *LWT - Food Science and Technology* 44: 2112-2118.
- Therdthai, N. and Zhou, W., (2009).** Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia Opiz ex Fresen*). *Journal of Food Engineering* 91: 482–489.
- Torregiani, D. and Bertolo, G., (2004).** Present and Future in process control and optimization of osmotic dehydration. From unit operation to innovate combined process: an overview. *Advances in Food and Nutrition Research* 48:174-198 Elsevier Academic Press. ISBN: 1043-4526.
- Torres, J.D, Talens, P., Carot, J.M., Chiralt, A. and Escriche, I., (2007).** Volatile profile of mango (*Mangifera indica* L.), as affected by osmotic dehydration. *Food Chemistry* 101:219–228.
- Torringa, E., Esveld, E., Scheewe, I., van den Berg, R. and Bartels, P., (2001).** Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *Journal of Food Engineering* 49: 185-191.
- Vadivambal, R. and Jayas, D.S., (2007).** Changes in quality of microwave-treated agricultural products—a review. *Biosystems Engineering* 98: 1-16.
- Vargas, A., Perez, J., Zoffoli, J.P. and Perez, A., (2001).** Comparación de variables de textura en la medición de firmeza de bayas de uva Thompson seedless. *Ciencia e Investigación Agraria* 28: 37-42.
- Vásquez-Parra, J.E., Ochoa-Martínez, C.I. and Bustos-Parra, M., (2013).** Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). *Journal of Food Engineering* 119: 648–654.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Bilbao-Sáinz, C., Uribe, E. and Lemus-Mondaca, R., (2008a).** Empirical modeling of drying process for apple (*Cv. Granny Smith*) slices at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32: 972–986.

- Vega-Gálvez, A., Lemus Mondaca, R., Bilbao-Sáinz, C., Fito, P. and Andrés, A., (2008b).** Effect of drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (*var. Lamuyo*). *Journal of Food Engineering*, 85: 42–50.
- Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J. and Perez-Won, M., (2009).** Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. *var. Hungarian*). *Food Chemistry* 117: 647–653.
- Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R. and Di Scala, K., (2012).** Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (*var. Granny Smith*) slices. *Food Chemistry* 132: 51-59.
- Vega-Mercado, H., Gongora-Nieto, M.M. and Barbosa-Canovas, G.V., (2001).** Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49: 271-289.
- Venkatachalapathy, K. and Raghavan, G.S.V., (1998).** Microwave drying of osmotically dehydrated blueberries. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 33: 95-102.
- Venkatachalapathy, K. and Raghavan, G.S.V., (1999).** Combined osmotic and microwave drying strawberries. *Drying Technology*, 17: 837-853.
- Wais, N., (2011).** Secado combinado de frutas: Deshidratación osmótica y microondas. Tesis doctoral presentada ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Plata.
- Wang, H., Cao, G. and Prior, R.L., (1996).** Total antioxidant capacity of fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44: 701–705.
- Wanyo, P., Siriamornpun, S. and Meeso, N., (2011).** Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. *Food and Bioproducts Processing*, 89: 22-30.
- Yang C.S.T. and Atallah W.A., (1985).** Effect of on the quality of intermediate moisture Lowbush blueberries. *Journal of Food Science* 50: 1233-1237.
- Yemmireddy, V.K, Chinnan, M.S., Kerr, W.L. and Hung, Y., (2013).** Effect of drying method on drying time and physico-chemical properties of dried rabbiteye blueberries. *LWT - Food Science and Technology* 50: 739-745.

- Yu, L., (1998).** Osmotic-Air dehydration of Cherries and Blueberries. A thesis presented to the University of Manitoba in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. Department of Biosystems Engineering. University of Manitoba. Winnipeg Manitoba.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S. and Wang, S., (2006).** Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science and Technology 17: 524-534.